



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**DIGITÁLNÍ ZPROVOZNĚNÍ ROBOTIZOVANÉHO
VÝROBNÍHO SYSTÉMU PRO OBSLUHU OBRÁBĚCÍHO
STROJE**

DIGITAL COMMISSIONING OF A ROBOTIC PRODUCTION SYSTEM FOR MACHINE TOOL TENDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Roun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Vetiška, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Jiří Roun**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/2021

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro obsluhu obráběcího stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současná doba klade stále větší důraz na rychlé zprovoznění nových výrobních systémů a jejich flexibilitu. Jednou z cest, jak tohoto cíle dosáhnout, je využití tzv. virtuálního zprovoznění nově navrhovaného výrobního systému. Cílem práce bude virtuální zprovoznění robotizovaného pracoviště pro obsluhu obráběcího stroje. Práce je založena na syntéze znalostí z mechaniky, elektrotechniky, automatizace, robotiky a programování.

Cíle diplomové práce:

Rešerše dané problematiky.
Systémový rozbor.
Sestavení virtuálního pracoviště.
Vytvoření sw pro pracoviště a jeho otestování.

Seznam doporučené literatury:

SICILIANO, Bruno a Oussama. KHATIB. Springer handbook of robotics. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie: 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-802-1448-285.
NOF, Shimon Y. Springer handbook of automation. 1. New York: Springer, 2009. ISBN 978-354-0788-300.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/2021

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty.

ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o digitálním zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro obsluhu obráběcího stroje. Rešeršní část práce popisuje současný stav poznání na poli produktů průmyslových robotů, jejich typech a možnostech a následně způsoby a SW možnosti pro realizaci virtuálního zprovoznění. Následuje zpracování systémového rozboru pracoviště. Praktická část této práce popisuje sestavení digitálního modelu a návrh SW. Závěrem je virtuální otestování funkce automatizovaného robotického pracoviště.

ABSTRACT

This master's thesis is about the digital commissioning of a robotic production system for a machine tool tending. The initial research describes the current state of the art in the field of industrial robotics. Their types and possibilities are followed by the types and SW capabilities for digital commissioning. The system analysis of the robotic work cell. The practical part of this thesis describes the creation of the digital model and SW design. At the end of the thesis is performed virtual testing of the robotic system.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotické pracoviště, robotika, řízení, testování, RobotStudio, TwinCAT, PLC, automatizace, roboty, OPC UA, Smart Component, Mechanism

KEYWORDS

Robotic workcell, robotics, control, testing, RobotStudio, TwinCAT, PLC, automation, robots, OPC UA, Smart Component, Mechanism

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROUN, Jiří. Digitální zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro obsluhu obráběcího stroje. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132067>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Janu Vetiškovi, Ph.D. za pomoc a cenné rady během vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat celé rodině za podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 21.05.2021

.....

Jiří Roun

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	16
2.1	Robot	16
2.2	TYPY ROBOTŮ	18
2.2.1	Sériová kinematická struktura	18
2.2.2	Paralelní kinematická struktura	19
2.3	Porovnání různých typů robotů stejné nosnosti.....	20
2.4	Digitální zprovoznění	21
2.4.1	Obecný popis	21
2.4.2	Komunikační rozhraní OPC UA	22
2.4.3	Způsoby virtuálního zprovoznění	22
2.4.4	Tecnomatix Process Simulate	24
2.4.5	Visual Components	25
2.4.6	ABB - RobotStudio	26
2.5	Systémový rozbor	28
2.5.1	Popis prováděné operace	28
2.5.2	Stojan na nástroje	29
2.5.3	Nástroj s chapadlem Schunk	29
2.5.4	Průmyslový robot IRB 4400/60	30
2.5.5	Lineární pojezd 4004.....	30
2.5.6	Systém výměny nástrojů SWS	30
2.5.7	Regál s deskami.....	31
2.5.8	Měřicí stanice	31
2.5.9	CNC obráběcí stroj.....	32
2.5.10	Bezpečnost pracoviště	33
3	PRAKTICKÁ ČÁST	35
3.1	Sestavení virtuálního pracoviště.....	35
3.1.1	Průmyslový robot s pojezdem	35
3.1.2	Stojan na nástroje	35
3.1.3	Obráběcí CNC stroje	36
3.1.4	Použité nástroje	37
3.1.5	Stojan s deskami.....	40
3.1.6	Měřicí stanice	41
3.1.7	Bezpečnostní prvky	43
3.1.8	Ostatní prvky pracoviště.....	44
3.2	Vytvoření SW pro pracoviště a jeho otestování	45
3.2.1	Tvorba SW v programu RobotStudio	45
3.2.2	Tvorba SW v programu TwinCAT 3	50
3.2.3	Testování SW pro virtuální pracoviště.....	54
3.2.4	Vytvoření HMI pro virtuální pracoviště.....	56
4	ZÁVĚR	57
5	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
6	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	63
6.1	Seznam zkratk.....	63
6.2	Seznam obrázků	64
6.3	Seznam tabulek.....	65
7	SEZNAM PŘÍLOHY	67

1 ÚVOD

Průmyslová automatizace je v dnešní době obor, který není nový, ale neustále se rozvíjí a proniká do více oblastí průmyslu. Robotizované výrobní systémy jsou jejím základním stavebním prvkem, avšak se stále rozšiřují hranice činností, které je možné automatizovat, od jednoduchých jednoúčelových strojů až po celé výrobní továrny.

Každým rokem je množství činností, které je možno automatizovat, větší. Je to způsobeno především pokrokem vědy a techniky jako takové. Výrobci snímačů a regulátorů přicházejí každý rok s novými výrobky, které odemykají nové možnosti. Za poslední dvě dekády jsme zažili spousty změn. Za předpokladu, že tempo těchto událostí se v budoucnu bude pravděpodobně pouze zrychlovat, jsem zvědavý, ale zároveň mám i obavy, jak bude svět vypadat za deset až dvacet let. Doufejme, že moderní automatizované systémy budou napomáhat nejenom v plnění výrobních objednávek, ale také k udržení bezpečného a příjemného životního prostředí.

Vzhledem k vysokým nárokům na možnost volby uživatelských modifikací výrobků je nutné již od rané fáze vývoje výrobních systémů počítat s tím, že stroj či zařízení musí být univerzální a flexibilní. Nejde zde však o to, aby formátové díly výrobního systému bylo možno vyměnit za polovinu pracovní směny. Automatizované systémy musejí zvládat změny variant vyráběných výrobků v rámci jednoho procesu bez zásahu obsluhy. Návrh, konstrukce a realizace takových systémů v rámci naší země přispěje k tvorbě nových pracovních míst a bude zvyšovat technické vzdělání.

Cílem této práce je provedení rešerše v oblasti průmyslových robotů a jejich virtuálního zprovoznění v rámci výrobních systémů, které je zpracováno jako přehled použitelných typů průmyslových robotů a programového vybavení pro jejich virtuální zprovoznění. Systémový rozbor dané automatizované buňky. V rámci praktické části je zpracována tvorba digitálního modelu robotizovaného výrobního pracoviště na platformě ABB RobotStudio a vytvoření SW, který bude výrobní systém ovládat a monitorovat.

Pevně věřím tomu, že tato práce poslouží novým studentům, kteří se setkají s robotickým pracovištěm stejné nebo obdobné konstrukce, jako návod pro zprovoznění základních funkcí a budou se moci věnovat zlepšování kvality a přesnosti jednotlivých parametrů systému.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Robot

Práce pojednává o průmyslových robotech. Slovo „robot“ jako takové je českého původu a poprvé bylo použito v dramatu R.U.R. od spisovatele Karla Čapka v roce 1920. [1]

Začátek vývoje, stavby a použití různých průmyslových robotů se odehrává v 2. polovině 20. století. Mezi lídry v této oblasti se řadí USA, Japonsko a Německo. Výrobci průmyslových robotů v bývalém Československu měli znalosti a ambice vyrábět a uvádět do provozu konkurence schopné stroje. Bohužel tehdejší změna režimu tomuto směru technologického vývoje nebyla nakloněna. [1]

Práce pojednává o robotizovaném výrobním pracovišti. Obecně se tato pracoviště skládají z průmyslového robotu s koncovým efektořem, vstupním a výstupním zásobníkem a strojem (zařízením) pro vykonání určité technologické operace. Dále je výrobní systém obvykle vybaven řadou senzorů, akčních a bezpečnostních prvků.

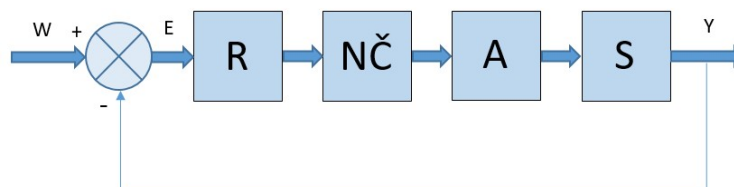


Obr. 1) Průmyslový robot IRB1100 [3]

Příklad průmyslového robotu od výrobce ABB (Obr. 1). Jedná se o 6-ti osý robot s užitným zatížením 4kg. Jedná se o menší robot, který je zejména vhodný pro montážní a testovací operace a také pro manipulaci tytu Pick and Place (Vezmi a Polož). [3]

Každá osa průmyslového robotu má svůj vlastní pohon. Z velké většiny se jedná o elektrický pohon. Z pravidla jsou použity elektrické servopohony. Servopohon je regulovaná zpětnovazební smyčka sloužící pro dosažení požadované hodnoty polohy. Servopohony mohou být rozděleny dle silového média. V případě použití elektrického pohonu, např. synchronního motoru, je možné tento motor řídit a regulovat ve vysoké přesnosti s dobrou opakovatelností. V případě použití tekutinových pohonů je nutné vzít v potaz vysokou stlačitelnost u pneumatických pohonů, která způsobuje komplikace při přesném polohování. V případě hydraulického pohonu je polohování jednodušší díky nestlačitelnosti použité kapaliny. [4]

Regulační obvod realizovaný pomocí blokového schématu (Obr. 2) znázorňuje jednotlivé části obvodu. Vstupem do obvodu je veličina W – požadovaná řídicí veličina. Tato veličina může být např. poloha pístu pneumatického válce. Veličina Y – regulovaná veličina je výsledná pozice. Regulovaná veličina Y se vrací na začátek regulačního obvodu v podobě zpětné vazby přes součtový člen, kde je porovnána s požadovanou veličinou W . Výsledkem tohoto porovnání je regulační odchylka E , která je výsledkem $E=W-Y$. Jednotlivé bloky blokového schématu regulačního obvodu fyzicky představují různé prvky. [2]



Obr. 2) Blokové schéma servopohonu

Nejčastěji se pro pohon os průmyslových robotů používá AC servomotor. Převod krouticího momentu je realizován ozubenými převody za použití ozubených soukolí a ozubených řemenů či převodovkami. Pohony průmyslového robotu jsou řízeny pomocí řídicího systému. Program pro vykonání dané aplikace je nahráný v řídicím systému. Většinou bývá řídicímu systému nadřazený program PLC, který monitoruje stav celé výrobní buňky a vyhodnocuje jej. V případě, že jsou např. otevřené bezpečnostní dveře do prostoru výrobního systému, není umožněn start sekvence programu. [2]



Obr. 3) Převod krouticího momentu 5. osy (vlevo) [6] řídicí systém OmniCore průmyslového robotu (vpravo) [5]

2.2 TYPY ROBOTŮ

Roboty se dělí podle několika parametrů. Základní rozdělení je podle použité kinematické struktury. Uvažujeme sériové a paralelní kinematické struktury. V případě sériové kinematické struktury jsou jednotlivé osy robotu řazeny za sebou.

2.2.1 Sériová kinematická struktura

Typickým příkladem je 6-tiosý průmyslový robot s multiúhlovým pracovním prostorem. Výrobci nabízejí tento typ průmyslového robotu v širokém spektru velikostí pracovního prostoru a nosností. Hodnota nosnosti je uvedena na připojovací přírubě 6. osy robotu. V případě použití velkoformátového koncového efektoru se nosnost snižuje s rostoucí vzdáleností od připojovací příruby. V technické dokumentaci pro daný typ robotu je uveden diagram, podle kterého je nutné ověřit, zda nebude robot přetížen. Organizace ABB poskytuje SW s názvem ABB RobotLoad, který na základě typu použitého robotu, velikosti a hmotnosti koncového efektoru provede výpočet, zda je nosnost robotu dostatečná pro danou aplikaci.

Průmyslové roboty s multiúhlovým pracovním prostorem jsou používány pro manipulaci, stohování, svařování, lakování, nanášení lepidel a tmelů, broušení, leštění a mnoho dalších výrobních procesů a technologií.

Dalším příkladem robotů se sériovou kinematickou strukturou je SCARA robot, který disponuje cylindrickým pracovním prostorem. SCARA roboty se vyznačují vysokou rychlostí a přesností. Robot se skládá z tří os rotačních a jedné osy translační. První dvě osy směrem od základny jsou rotační a zajišťují pohyb v prostoru. Pohyb koncového efektoru v ose Z je zajištěn pomocí translačního pohybu. Natočení koncového efektoru je opět realizováno rotačním pohybem. [8]

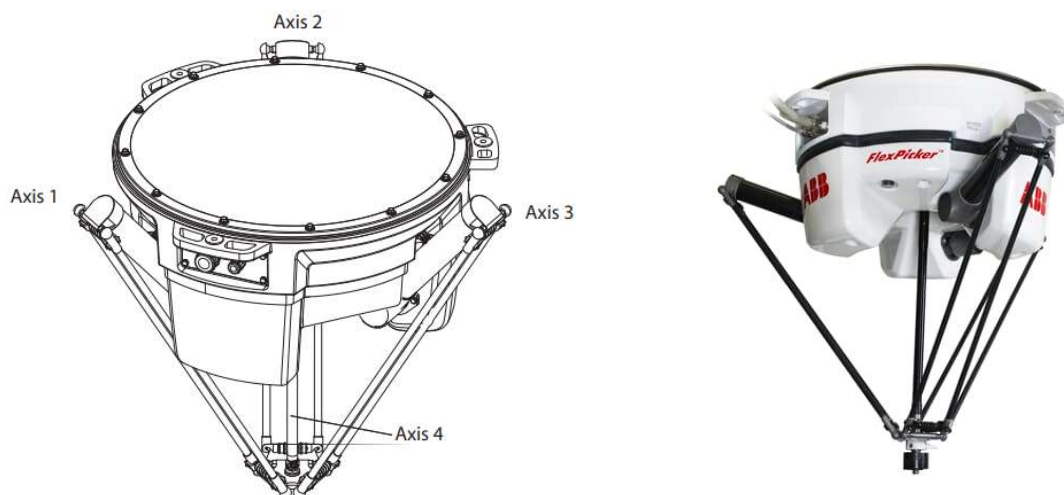
SCARA roboty jsou používány při montáži drobných dílů, primární i sekundární balení v potravinářském a farmaceutickém průmyslu a inspekční činnosti. Díky kompaktní velikosti a vysokým rychlostem jsou tyto jednotky umísťovány do výrobních linek drobných produktů. Rychlosti jednotlivých os SCARA robotů se liší. První rotační osa je zpravidla pomalejší díky velkému momentu setrvačnosti. Rychlost rotace následující osy je vyšší.



Obr. 4) Průmyslový robot IRB 1410 (vlevo) [7] robot IRB 910SC (vpravo) [8]

2.2.2 Paralelní kinematická struktura

Typickým reprezentantem robotů s paralelní kinematickou strukturou je tzv. Delta robot. Konstrukce delta robotu je patrná na první pohled. Základna robotu je umístěna na stropě daného zařízení či nosné konstrukci výrobní linky. Konstrukce pro umístění robotu musí být velmi tuhá a to z toho důvodu, že delta robot při svých pohybech o vysokých rychlostech vyvolává vysoké setrvačné síly a vibrace. Veškeré pohony delta robotu jsou umístěny v jeho základně. Ramena robotu jsou vyrobeny z lehkých slitin případně z uhlíkových vláken pro zajištění nízké váhy pohybujících se částí robotu.



Obr. 5) Delta robot s popisem os (vlevo) [10] fotografie delta robotu (vpravo) [9]

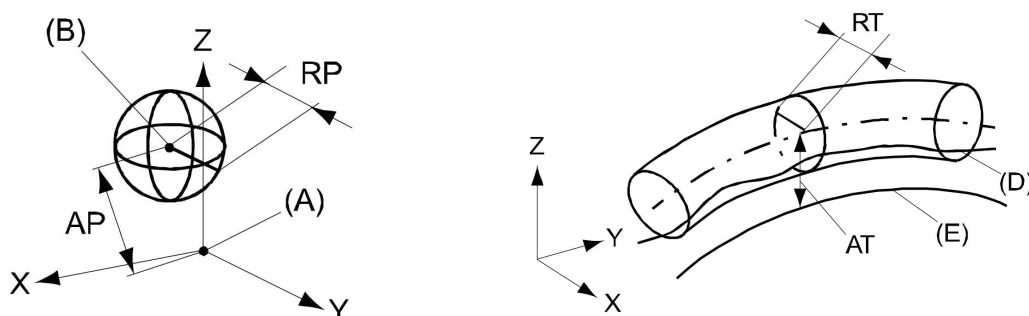
Každá rotační osa delta robotu je poháněna vlastním motorem. Tři rotační osy jsou použity pro manipulaci koncovým efektem v prostoru. Čtvrtá rotační osa je použita pro rotaci s koncovým efektem.

Delta roboty jsou především používány pro aplikace Pick and Place v různých průmyslových odvětvích. Především se jedná o primární a sekundární balení v potravinářské a farmaceutické výrobě, paletizaci apod. Ve spojení s technologií strojního vidění je možné vytvořit robotizované pracoviště, které odebírá náhodně orientované výrobky z dopravníkového pásu pomocí podtlakového chapadla, upraví jejich orientaci a přemístí výrobek do požadované polohy. Při nasazení těchto robotů není nutné vytvářet konstrukční podsestavy, které by sloužily pro správné orientování výrobků na dopravníkovém pásu. Při přepnutí či zavádění výroby nového produktu pouze nahrajeme nový SW bez nutnosti výměny či přenastavení formátových dílů výrobního systému.

2.3 Porovnání různých typů robotů stejné nosnosti

Tabulka (Tab. 1) porovnává typy robotů. Jednotlivé roboty mají svoje přednosti a zápory. Při výběru průmyslového robotu pro danou aplikaci je nutné zvážit všechny potřeby a aspekty daného robotu. Některé aplikaci vyžadují vysokou přesnosti při nízké hmotnosti manipulovaného předmětu. Jiné aplikace vyžadují vysokou rychlost na úkor ztráty části přesnosti při polohování břemene.

Přesnost průmyslových robotů je měřena a ověřována podle normy ISO 9283. Norma popisuje způsoby měření pro ověření jednotlivých parametrů robotu, jako jsou jednosměrná přesnost polohy a opakovatelnost polohy, změna vícesměrné přesnosti polohy, doba stabilizace polohy apod. Porovnání parametrů robotů je relevantní, právě tehdy když jsou porovnávány roboty testované podle též normy. [12]



Obr. 6) Parametry přesnosti polohy pro bod (vlevo) a pro dráhu (vpravo) [10]

Kde: (A) – nastavená poloha, (B) – střední poloha robotu při běhu programu, AP – střední vzdálenost od nastavené polohy, RP – tolerance pozice bodu (B) při opakovaném najíždění na pozici, (E) – nastavená dráha, (D) – aktuální poloha při běhu programu, AT – maximální odchylka od E k průměrné poloze dráhy, RT – toleranční pole dráhy při opakovaném běhu programu

Tab. 1) Porovnání přesnosti různých typů robotů [4], [10], [11]

	Delta Robot				6tiosý robot		SCARA Robot	
	IRB 360-1				IRB 1100		IRB 910SC	
	0,1 kg	1,0 kg	3,0 kg	8,0 kg	4,0 kg/0,475m	4,0 kg/0,58m	3,0 kg/0,55m	3,0 kg/0,65m
Přesnost polohy AP [mm]	0,01	0,04	0,1	0,04	i	i	0,01	0,01
Opakovatelnost polohy RP [mm]	0,1	0,09	0,06	0,07	0,01	0,1	0,01	0,01
Doba stabilizace polohy Pst [s]	i	0,03	0,05	0,05	0,08	0,19	0,19	1,01
Přesnost dráhy AT [mm]	0,51	0,52	1	2,32	i	i	0,7	0,65
Opakovatelnost dráhy RT [mm]	0,3	0,21	0,14	0,1	0,05	0,05	0,06	0,06

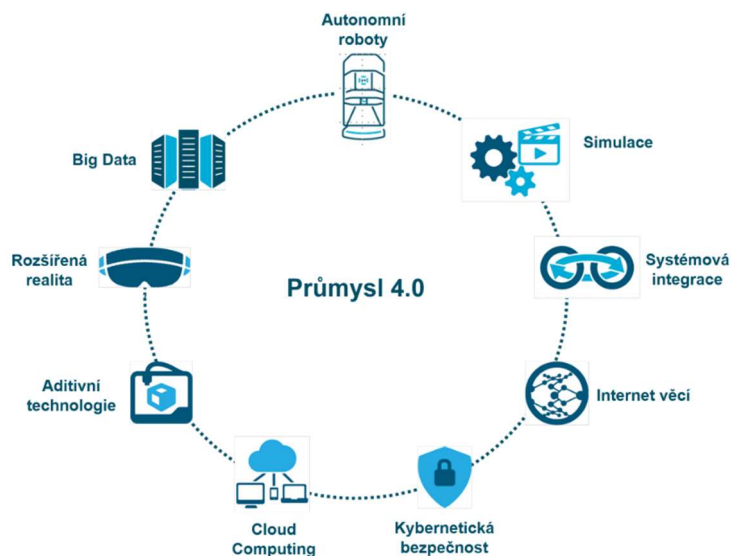
i - dosud neměřeno

Z porovnání výše plyne, že robot typu SCARA s označením IRB 910SC má velice dobré výsledky parametru Přesnost polohy AP a Opakovatelnost polohy RP i za předpokladu, že nejsou k dispozici hodnoty těchto parametrů pro 6tiosý robot. Ovšem vzhledem k vysokým rychlostem, kterých SCARA roboty dosahují a jejich, relativně vysoká hmotnost jednotlivých os narůstá doba pro zastavení v dané poloze. Parametr Doba stabilizace polohy dosahuje nejpříjemnějších hodnot v případě použití Delta robotu. Robot 6-ti osé konstrukce leží svými parametry mezi Delta robotem a SCARA robotem. Tento typ robotu nedosahuje takových rychlostí jako zbylé dva typy ovšem jeho rozsah pracovního prostoru a možnost natočení koncového efektoru v prostoru umožňuje jeho nasazení v různých průmyslových oblastech.

2.4 Digitální zprovoznění

2.4.1 Obecný popis

Průmysl 4.0, Industrie 4.0, Industry 4.0 neboli 4. průmyslová revoluce je slovní spojení, které je v dnešní době velice často slyšet a vidět nejenom v odborných článcích a rozhovorech. Zatím co opravdové myšlenky, procesy a systémy Průmyslu 4.0 implementují pouze velké technologické společnosti z odvětví automotive, pharma, výrobci zařízení pro výrobu a zpracování polovodičů a další. Na druhé straně jsou firmy i ne zrovna malé, které spoustu dat a informací uchovávají tzv. “na papíře”. Příštích 10 let máme k tomu, abychom stávající procesy zefektivnili na takovou úroveň, která zabezpečí dostatečnou konkurenční výhodu jak oproti západním tak i východním dodavatelům. Hranice technických znalostí a úrovně používaných technologií se směrem na východ stále posouvá. Nepřidává tomu ani fakt, že s rostoucí úrovní automatizace v rámci výrobního podniku klesá počet zaměstnanců vykonávajících rutinní činnosti. Ano, požadavky na techniky ovládající základy PLC pro údržbu strojů a programování robotů se stále zvyšují. Je však finančně výhodnější zaplatit malý tým specialistů než stovky dělníků. Pro splnění požadavků na snižování ceny výrobků je nutné stále zvyšovat poměr automatizace vůči lidské práci. V případě zavádění nových produktů do výroby je nutné velkou část těchto procesů provést off-line. Díky tomu je možné ihned po dokončení mechanického návrhu simulovat a analyzovat jeho výrobní postup/proces. Dnes si mezi těmito SW můžeme vybírat. Některé jsou omezeny pouze na produkty daného výrobce, jiné jsou poté plně kompatibilní s produkty různých výrobců. Všechny aplikace mají společné výhody. Patří mezi ně značná úspora času, možnost vzdáleného servisu, příprava digitálního pracoviště ještě před fyzickým dokončením pracoviště, plynulé zavádění nových revizí výrobků a mnoho dalšího.



Obr. 7) Jednotlivé prvky Průmyslu 4.0. Přeloženo z [13]

Pojem virtuální zprovoznění představuje sestavení digitálního pracoviště za použití 3D modelů jednotlivých částí výrobního systému. Jedná se o stejné modely, jako jsou použity pro tvorbu výkresové dokumentace a výrobu jednotlivých dílů. Následuje vytvoření kinematických struktur pro jednotlivé mechanismy. Během sestavování virtuálního pracoviště je nutno vytvořit relevantní mechanismy jednotlivých částí, jako je tomu v případě reálného pracoviště. V případě detekce nedostatku v návrhu je možno provést požadované změny na afektovaných položkách ještě před jejich výrobou a ušetřit tak čas a finanční zdroje oproti zjištění nedostatku až při fyzickém sestavování pracoviště. Takto sestavené pracoviště se poté propojí s reálným nebo virtuálním řídicím systémem. Pro toto propojení je možno využít např. SW Simit od výrobce Siemens nebo komunikaci přes OPC UA. [14]

V rámci digitálního zprovoznování jsou vytvářeny modely výrobních pracovišť, továren či například celých měst. Následně je možno simulovat různé situace a nejlepší řešení převádět do reálného života. Použití těchto metod nejenom, že dokáže zlepšit produktivitu, ale může zachraňovat lidské životy při přírodních katastrofách.

2.4.2 Komunikační rozhraní OPC UA

OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture umožňuje propojení jednotlivých zařízení komunikujících např. přes Ethernet a RS232 pomocí OPC Serveru s OPC Clientem (Obr. 8). Odpadá zde nutnost řešit propojení každého prvku zvlášť. Této možnosti je využito v případě, že je reálné pracoviště vybaveno snímači a aktuátory určenými pro různé průmyslové sběrnice. V praktické části bude popsána varianta propojení pomocí OPC UA. Obrázek níže ilustruje možnosti použití komunikace pomocí OPC UA napříč jednotlivými technologickými segmenty. Možnosti komunikace přes OPC UA jsou značné a vzhledem k této skutečnosti lze konstatovat, že se jedná o způsob komunikace, který se bude s postupující digitalizací výroby pouze rozšiřovat. [15]

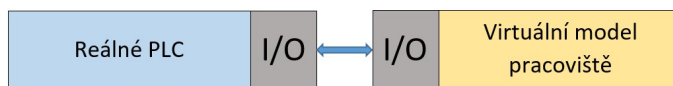


Obr. 8) Možnosti komunikace přes OPC UA [43]

2.4.3 Způsoby virtuálního zprovoznění

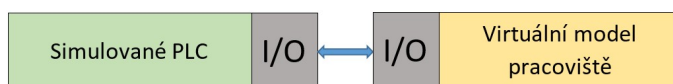
Rozlišujeme dva způsoby virtuálního zprovoznění. Zkratky těchto způsobů jsou SIL a HIL. *SIL – Software in the Loop*. *HIL – Hardware in the Loop*. V praxi se jedná o způsob připojení nadřazeného řídicího systému k virtuálnímu modelu. Každý z těchto způsobů s sebou nese určité výhody i nevýhody. [36]

V případě zprovoznění pomocí způsobu HIL se jedná o propojení reálného řídicího systému s virtuálním modelem pracoviště (Obr. 9). Během testování se program tzv. odladí na reálném ŘS, který je následně použit při provozu aplikace. Díky tomuto přístupu je ověřena správná funkce použité HW a riziko problému s komunikací při testování výrobního systému je minimální. Obrázek níže popisuje způsob komunikace v případě virtuálního zprovoznění typu HIL. [37] [38]



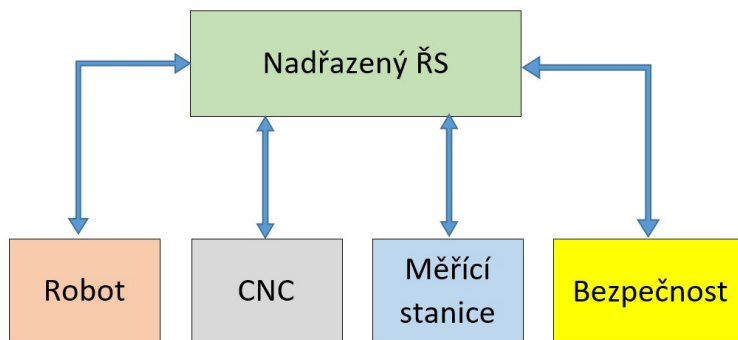
Obr. 9) HIL. Vychází z [41]

U SIL se jedná o situaci, kdy je virtuální model pracoviště řízen pomocí simulovaného PLC (Obr. 10). Jak simulované PLC tak virtuální model pracoviště může být spuštěn na jednom osobním počítači, který je vybaven standardním HW. Popřípadě je možné využít dvou zařízení, kdy je na jednom spuštěn model pracoviště a na druhém simulace PLC. Propojení obou stanic je poté zajištěno např. pomocí Wi-Fi. Tento způsob zprovoznění je uživatelsky příjemnější a to z toho důvodu, že není nutné fyzické elektrické propojení mezi HW a SW. Nevýhodou však zůstává možnost výskytu chyby komunikace během reálného ožívování systému na stavbě. [39] [40]



Obr. 10) SIL. Vychází z [41]

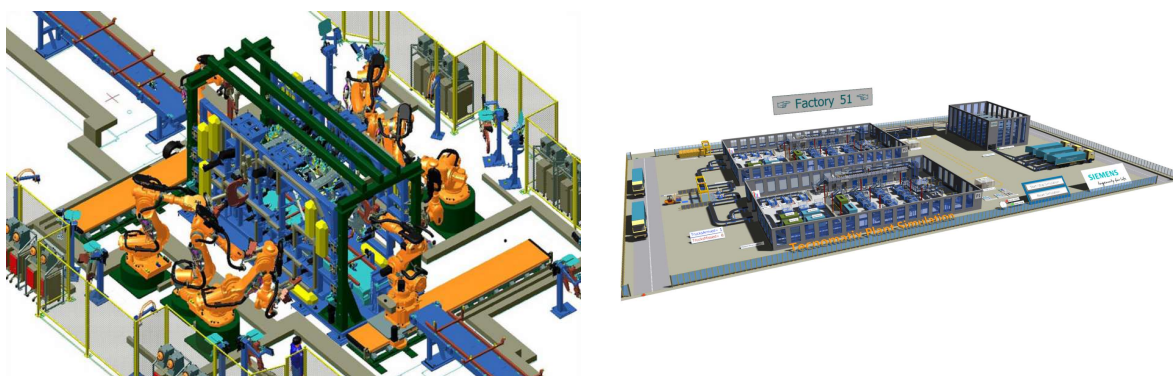
Výrobní systém je zpravidla ovládán nadřazeným řídicím systémem. Pracoviště, které je řešené v praktické části lze schematicky popsat dle obrázku (Obr. 11) níže. Nadřazený řídicí systém se stará o chod průmyslového robotu, ovládá obráběcí stroj, měřicí stanici a bezpečnostní okruh pracoviště. Tento princip lze obecně aplikovat na téměř jakýkoliv výrobní systém. Pouze se bude měnit počet a druh periferních zařízení podle dané aplikace.



Obr. 11) Schématické znázornění komunikace v rámci výrobního systému

2.4.4 Tecnomatix Process Simulate

Jedna z prvních firem v tomto odvětví byla Izraelská firma Tecnomatix, která nabízela program ROBCAD. Zpočátku byl tento SW vyvíjen pouze pro operační systém UNIX od Americké firmy AT&T. Následovala akvizice konkurenčních společností ANYSIM a SIMPLE++. Na základě velkého zájmu o možnost práce s tímto programem na platformě Windows začala firma Tecnomatix s migrací SW. Poté byla firma Tecnomatix koupená společností UGS Corporation v roce 2005 a následně přešla do vlastnictví firmy Siemens AG, kde se připojila do portfolia již zavedených PLM produktů. Nyní je známá pod názvem Tecnomatix Process Simulate dále jen PS. Digitální model pracoviště v prostředí aplikace PS je na (Obr. 7). [17] [18]



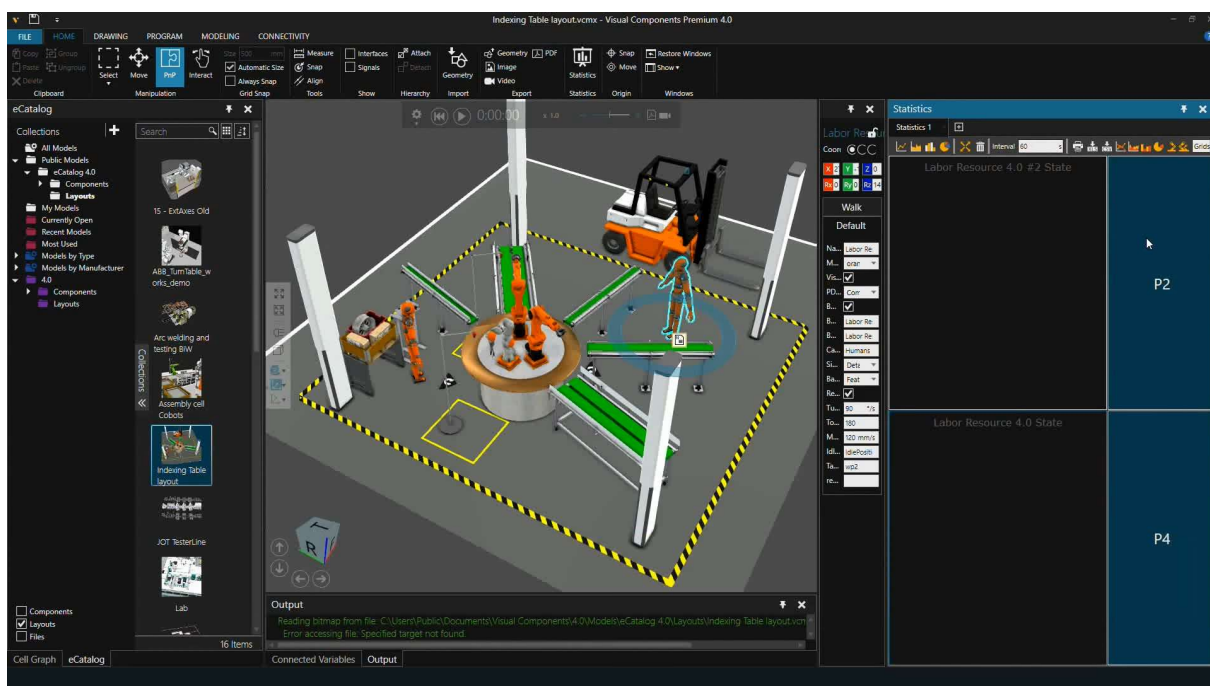
Obr. 12) Digitální model pracoviště (vlevo) [16] model celého výrobního areálu (vpravo) [19]

V prostředí PS je možné vytvářet digitální modely celých výrobních závodů (Obr. 12) a následně simulovat a optimalizovat stávající procesy nebo vytvářet pracoviště pro nové produkty a zkrátit tak čas potřebný pro uvedení výrobku na trh či dodání k zákazníkovi v případě subdodavatelů. PS patří do SW rodiny firmy Siemens, kde sdílí základní vzhled s ostatními programy, které jsou součástí portfolia PLM (Product Lifecycle Management).

PS slouží k simulaci procesních a výrobních operací. Simulace se může skládat z lidské práce či z vykonávání činnosti pomocí automatizované techniky v podobě manipulátorů a průmyslových robotů. Na základě dílčích výsledků je možné upravovat rozvržení pracoviště a zlepšovat tak produktivitu výroby a ergonomii. Simulace lidské práce je v rámci PS velice propracovaná a je možné ovládat i jednotlivé prsty lidského modelu. Dále je možné při použití sady senzorů a SW pro snímání reálných lidských pohybů od společnosti Xsens importovat tyto data přímo do PS a zde je dále zpracovávat.[15] [32]

2.4.5 Visual Components

Finská společnost založená v roce 1999 s cílem vytvořit SW pro návrh a simulace, který bude uživatelsky přívětivý a jednoduchý na obsluhu. V roce 2003 představila společnost KUKA svůj SW KUKA.Sim Layout, který pro ně vytvořila společnost Visual Components. Dále v roce 2003 VC vydali svoji první řadu produktů podporující 3D zobrazení pro návrh, automatizaci a simulaci. V roce 2016 společnost vydává novou moderní sadu SW pod názvem Visual Components 4.0 a v následujícím roce probíhá akvizice společnosti VC firmou KUKA. Pro obě strany je tato transakce výhodná. Společnost KUKA si upevnila místo na trhu, co se týče simulačního prostředí vlastní značky, a VC se přesunula pod křídla velice stabilní společnosti. KUKA po akvizici oznámila, že SW Visual Components i nadále zůstane neutrální simulační platformou, co se týče podporovaných výrobců a jejich produktů. Již nyní je možné vybírat z více jak 1500 modelů od více než 50 světových výrobců. [20]



Obr. 13) Uživatelské prostředí programu Visual Components 4.0.2 [21]

Vzhledem k možnosti vybírat z velkého množství výrobců a jejich produktů se program VC stává velice univerzálním nástrojem a u zákazníků, kteří v rámci svých pracovišť využívají průmyslové roboty od různých výrobců, získává náskok oproti některým konkurenčním SW. V rámci integrovaného katalogu součástí je možno vybírat z více než 2500 přednastavených položek od předních světových dodavatelů na poli automatizační techniky. Nechybí možnost sdílení simulací pro sledování pomocí headsetu pro virtuální realitu. Dále je zde již přednastavená možnost pro připojení reálného PLC kontroléru od společnosti Siemens s označením S7-1200 nebo virtualizovaného PLC S7-PLSIM.[20]

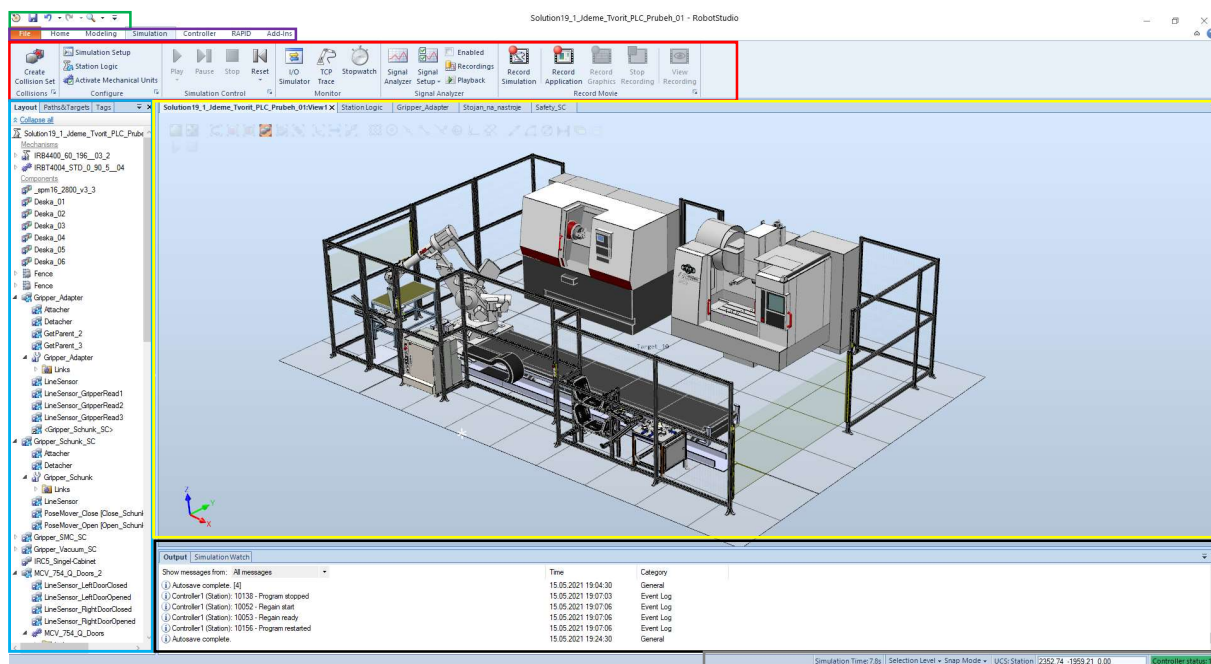
2.4.6 ABB - RobotStudio

Jako další SW pro off-line programování automatizovaných a robotických pracovišť slouží RobotStudio dále pouze RS od společnosti ABB. Vzhledem k tomu, že tento SW bude využíván v této diplomové práci, jej popíšeme detailněji, než tomu bylo u SW Process Simulate a Visual Components.

Historie RS sahá do 90. let minulého století. Během tohoto desetiletí se ABB dostalo na americký trh s roboty díky nákupu firmy Cincinnati Milacron. Byl vyvinut robot IRB 6000, který byl ve své době nejpreciznější a nejrychlejší svařovací robot. Dále byl představen velice rychlý delta robot FlexPicker pro automatizované odebírání a balení. V neposlední řadě byl představen SW s názvem RobotStudio, který byl revoluční díky podpoře off-line programování. [42]

Popis uživatelského prostředí

Uživatelské prostředí programu RS je svojí základní strukturou a uspořádáním jednotlivých ovládacích prvků velice podobné ostatním SW dnešní doby. Pro jednoduchost práce bude RS nastaveno do anglického jazyka. České překlady některých příkazů mohou být zmatečné a kultura ve větších firmách preferuje použití anglického jazyka.



Obr. 14) Uživatelské prostředí programu RobotStudio

Rychlý panel, který je na Obr. 14) orámován zelenou barvou, umožňuje rychlé uložení aktuálního projektu, krok zpět, krok vpřed. Pod tlačítkem s ikonou lupy se poté nachází rolovací seznam se všemi příkazy. Vyhledávání je možno pomocí části textu či pomocí výběru daného příkazu přímo ze seznamu. Pod tlačítkem s ikonou šipky směřující dolů je možno na rychlý panel připnout další funkce a tím panel přizpůsobit na míru každému uživateli.

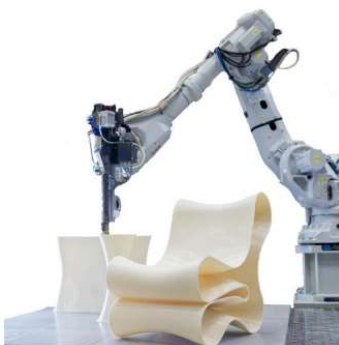
Následuje pás karet, který je na Obr. 14) orámován fialovou barvou. File, Home, Modeling, Simulation, Controller, Rapid, Add-Ins. Každá karta pod sebou skrývá sadu možností, které jsou orámovány červenou barvou. V rámci karty Home se jedná o práci s robotem, především tvorbu bodů, drah, manuální polohování robotu, vkládání geometrie, apod.

Karta Modeling umožňuje vkládání Smart Component, prázdných dílů pro další zpracování, tvorbu jednoduchých modelů přímo v RS, využití nástavby Equipment Builder, tvorba nástrojů a mechanismů, případně funkce měření. Karta Simulation zastřešuje nastavení simulace jako takové, simulaci vstupů a výstupů, tvorbu Collision Setu, měření délky simulace a záznam obrazovky při simulaci. Karta Controller umožňuje přidávání virtuálních kontrolérů či připojení ke kontroléru reálnému a všechny příkazy s tím spojené jako je restart kontroléru, vytvoření zálohy z kontroléru, spuštění virtuálního FlexPendantu, přidávání vstupních a výstupních signálů v rámci možnosti Configuration. Karta RAPID slouží pro práci s RAPID editorem. Umožňuje synchronizaci RAPID kódu do a ze stanice, úpravu nebo vytváření RAPID kódu jako takového a další funkce pro práci s RAPID editorem. Karta Add-Ins slouží pro instalaci rozšiřujících a doplňkových programových balíčků a umožňuje přehled o aktuálně nainstalované verzi RobotWare.

Rozvržení po levé straně obrazovky programu zobrazuje na kartě Layout strom aktuálně vložených prvků, na kartě Paths and Targets je seznam jednotlivých bodů, drah a informace o jednotlivých vložených nástrojích. V centrální části obrazovky je žlutě orámován prostor pro jednotlivé okno na základě zvolené možnosti. Obr. 14) představuje pohled na aktuální řešení v podobě 3D modelu stanice. Pod tímto oknem je černě orámovaný prostor pro textové výstupy z aplikace. Zobrazují se zde např. informace o aktuálním stavu simulace, varování a chyby. Obr. 14) šedě orámování představuje informace o základních parametrech při tvorbě pohybových instrukcí, použitím nástroji a aktuálním stavu virtuálního kontroléru.

Popis systémového prostředí

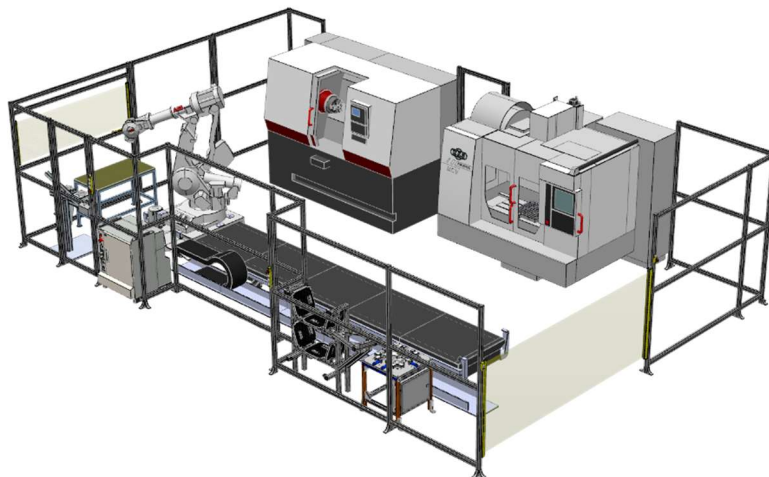
RobotStudio stejně jako ProcessSimulate a Visual Components pracuje s virtuálním kontrolérem, který je spuštěný na pozadí programu. V případě RS se jedná o kontrolér IRC5 případně pak OmniCore. Díky tomu je možné 1:1 virtuálně zprovozňovat robotické linky a pracoviště. K dispozici je také možnost využití simulace fyzikálních vlastností jednotlivých těles a tím posunout digitálně zprovozněné pracoviště na vyšší úroveň. RS je možné využít jak pro off-line programování s virtuálním kontrolérem, tak i pro online programování průmyslového robotu napojeného na reálný kontrolér. Tímto je možné nahradit programování robotu pomocí FlexPendantu, což může vést ke zlepšení ergonomie práce i v případě programování robotu přímo na jeho finálním pracovišti. Společnost ABB dále nabízí možnost rozšíření RS pomocí balíčků pro jednotlivé specifické úlohy. Je zde například možnost tzv. PowerPacu pro 3D tisk, který umožňuje zpracování již vytvořeného g-kódu pro úlohu 3D tisku pomocí průmyslového robotu (Obr. 15). Díky této nástavbě je možné rychlé a cenově dostupné prototypování i rozměrných dílů. [22]



Obr. 15) Příklady 3D tisku pomocí průmyslového robotu. 3D tisk nábytku (vlevo) a 3D tisk pomocí svařování (vpravo) [23]

2.5 Systémový rozbor

Digitálně zprovozněvané pracoviště (Obr. 16) má svoji reálnou podobu v laboratoři ÚVSSR FSI VUT v Brně. Jedná se o komplexní výrobní systém, jehož dílčí funkční prvky a systémy jsou kritické z důvodu jeho bezpečné a spolehlivé funkce. V následující části bude popsán systémový rozbor zpracovávané robotické buňky. Pracoviště slouží pro vykonávání několika různých operací a je možné jej dále rozšiřovat a optimalizovat.



Obr. 16) 3D náhled pracoviště v RS

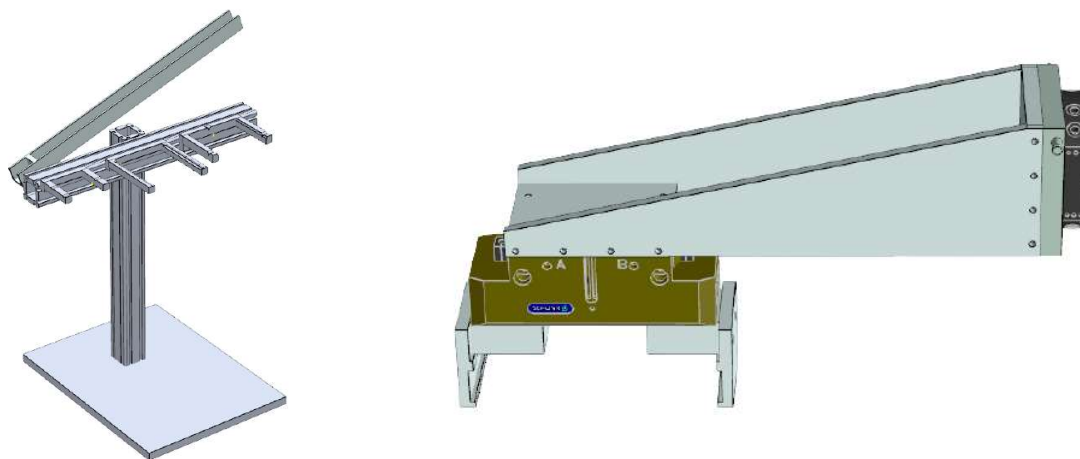
2.5.1 Popis prováděné operace

V rámci zpracovávané úlohy jsou průmyslovým robotem osazeným nástrojem s uchopovacím systémem Schunk manipulovány testovací ocelové desky. Robot nejprve provede operaci odebrání požadovaného nástroje ze stojanu a následně přejede před regál s nachystanými deskami. Na základě zvolené operace odebere požadovanou desku nebo začne od první desky zpracovávat celý regál. Robot přemístí TCP daného nástroje na souřadnice pro uchopení desky. Před příjezdem na tuto polohu jsou čelisti paralelního chapadla otevřeny a jejich poloha je ověřena. Chapadlo se přesune do polohy zavřeno a začne vyjíždět ze stojanu. Jakmile je mimo prostor stojanu zahájí přesun desky na skluz, který je součástí stojanu s deskami. Na skluzu provede přechycení desky pro zajištění správné nulové polohy. Ze skluzu je deska přesunuta k měřicí stanici. Před příjezdem k měřicí stanici je vyslán signál pro zdvih platformy pro uložení desky. Proběhne přechycení manipulované desky. Na základě dalších signálů je platforma s deskou snížena do měřicí polohy a jsou aktivovány pneumatické válce. Písty s dorazy přitlačí měřenou desku vůči pevným dorazům, které jsou součástí rámu měřicí stanice. Nyní proběhne měření. Následuje uchopení desky z měřicí stanice robotem.

Robot zahájí přesun desky k CNC obráběcímu stroji MCV 75 Q. Zde je vyslán signál pro otevření dveří obráběcího stroje. Po otevření dveří robot vloží desku na magnetický upínač a odešle pulz pro jeho aktivaci. Jakmile se vrátí signál, že je magnetický upínač aktivován, robot otevře chapadlo, vyjede z pracovního prostoru obráběcího stroje, následně odešle signál na zavření dveří a na spuštění obráběcího cyklu. Po dokončení obrábění je vyslán signál. Robot odešle signál pro otevření dveří a provede odebrání obrobene desky zavřením chapadla a deaktivací magnetického upínače. Následně je provedeno měření po obrobení a založení do regálu na pozici, ze které byla deska odebrána. V závislosti na zvolené operaci je buď manipulována další deska, nebo se robot vrací ke stojanu s nástroji, kde založí aktuálně nasazený nástroj a je nachystaný na další příjem další operace.

2.5.2 Stojan na nástroje

Stojan (Obr. 17) na nástroje se skládá z ocelové desky o rozměrech 520x680x25mm, která slouží jako základna. Zbývající část konstrukce tvoří noha z extrudovaného hliníkového profilu, příčník, jednotlivé pozice pro nástroje složené z hliníkových dílů a U-profil pro vložení kostek. Jak přítomnost kostek, tak přítomnost jednotlivých nástrojů je monitorována pomocí indukčních snímačů.



Obr. 17) Stojan na nástroje (vlevo) a nástroj s chapadlem Schunk (vpravo)

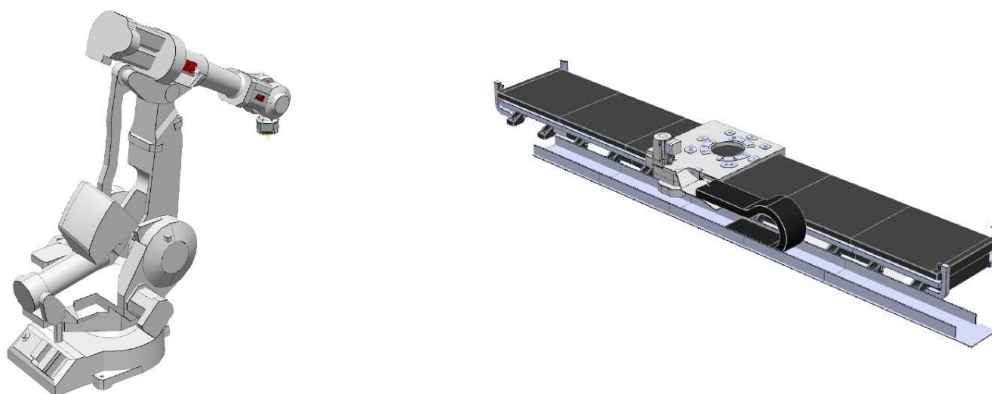
2.5.3 Nástroj s chapadlem Schunk

Pro manipulaci s deskami slouží nástroj s chapadlem Schunk (Obr. 17) PGN-plus 200. Pohon chapadla je zajištěn pomocí stlačeného vzduchu. Zdvih na jednu čelist je 25mm. Zavírací síla činí 2700N. V případě využití otevírací síly je hodnota této veličiny 2870N. Odolnost vůči okolní teplotě je maximálně 90°C. [24]

TCP je oproti rychloupínací přírubě vysazen v ose $x=240\text{mm}$ a v ose $z=466\text{mm}$.

2.5.4 Průmyslový robot IRB 4400/60

Průmyslový robot je zde použit od společnosti ABB s označením IRB 4400/60 (Obr. 18). Jedná se o extrémně rychlý a kompaktní průmyslový robot. Vzhledem ke svým vlastnostem je vhodný pro velké množství výrobních aplikací. Díky své nosnosti, která je 60kg, umožňuje manipulaci až se dvěma výrobky najednou při vysokých rychlostech. Jako řídicí systém je použit IRC5 od ABB.[25]



Obr. 18) IRB4400 a IRBT4004

2.5.5 Lineární pojezd 4004

Lineární pojezd (Obr. 18) přidává průmyslovému robotu 7. osu a rozšiřuje tak jeho pracovní obálku. Pojezdy jsou modulární a je možné je skládat dle potřeb daného pracoviště. Pojezdy jsou nabízené s různými typy vozíků – dvojitě, zrcadlové. Díky vestavěnému plánování pohybu dosahuje tento pojezd nejlepších hodnot doby cyklu, nejvyšší rychlosti a přesnosti dráhy ve své třídě.[26]

2.5.6 Systém výměny nástrojů SWS

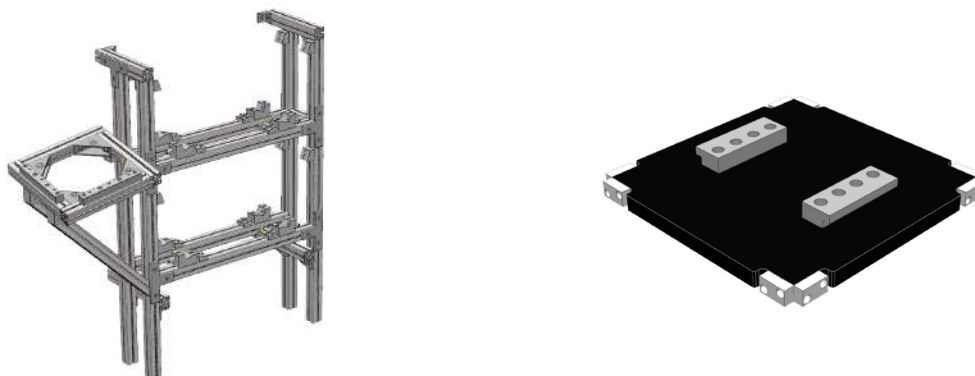
Robot je vybaven systémem automatické výměny nástrojů s označením SWS od výrobce Schunk. Díky patentovanému uzamykání nedojde při ztrátě tlaku k rozpojení. (Obr. 19 vlevo) znázorňuje grafickou reprezentaci adaptéru v RS a vpravo je jeho reálná podoba.[27]



Obr. 19) Systém automatické výměny nástrojů [27]

2.5.7 Regál s deskami

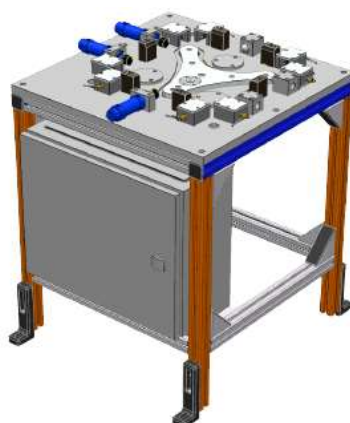
Dalším prvkem robotického pracoviště je regál (Obr. 20 vlevo) s deskami (Obr. 20 vpravo). Regál je složený z extrudovaných hliníkových stavebnicových profilů a dalšího příslušenství. Každá pozice pro desku je osazena indukčním snímačem. Signál je odesílán do PLC, které zobrazí daný stav na HMI a předává informaci robotu. Dále je součástí regálu skluz, který zajišťuje správné uchopení desky vůči nástroji umístěném na robotu.



Obr. 20) Regál bez desek (vlevo) a samotná deska (vpravo)

2.5.8 Měřicí stanice

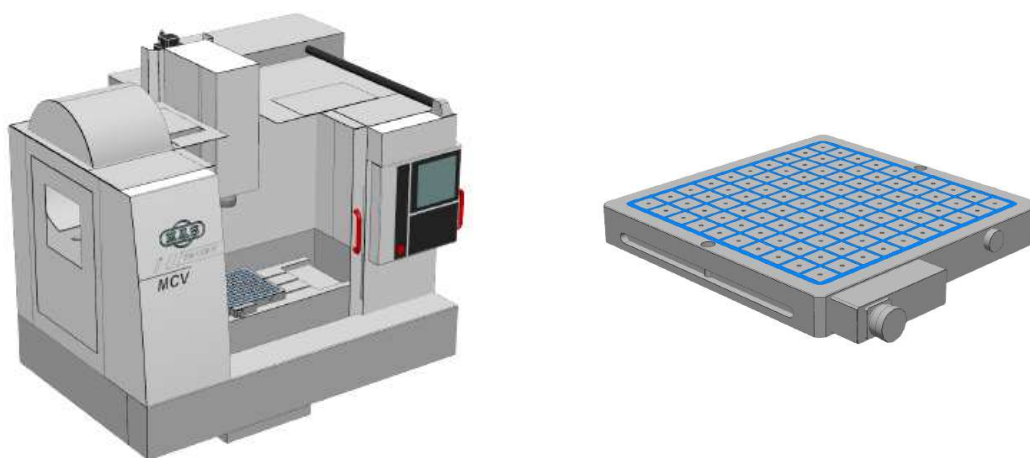
Měřicí stanice (Obr. 21) je v rámci reálného pracoviště realizována jako samostatné zařízení s vlastním řídicím systémem Siemens SIMATIC S7-1200 a vlastním HMI. Stanice slouží pro měření délek a kolmostí u obráběných desek před a po obrobení. Pro měření jsou použity lineární indukční snímače. Pro každý roh manipulované desky jsou použity dva lineární snímače. Zdvih základny pro umístění desky z nástroje je realizován pomocí pneumatického válce. Vedení této základny je zajištěno pomocí lineárních kuličkových ložisek, ve kterých se pohybují kalené tyče spojené se základnou. Dotlačení kontrolované desky na dorazy je také realizované pomocí pneumatických válců. V jednom směru je použit jeden pneumatický válec a v druhém směru jsou válce dva. Kombinace dvou a jedno pneumatického válce zajistí dotlačení desky vůči přímce a jeden samostatný válec potom dotlačení vůči jednomu bodu. [28].



Obr. 21) Měřicí stanice

2.5.9 CNC obráběcí stroj

Reálné pracoviště je vybaveno tříosou CNC frézou MCV 754 QUICK (Obr. 22 vlevo) od výrobce KOVOSVIT MAS. Stroj je osazen pneumatickými válci pro ovládání pohybu dveří a sadou senzorů, které snímají polohy otevřeno a zavřeno. Dále je na pracovním stole stroje přimontován magnetický upínač MFRS-A1-032 (Obr. 22 vpravo) o rozměrech 430 x 430mm, který je důležitý pro provoz celého pracoviště v automatickém režimu. Obráběcí stroj disponuje vřetenem o výkonu 9kW a maximálními otáčkami až 10 000 ot./min. OS zvládne širokou škálu obráběcích operací. Obrábět lze různé materiály, a proto je toto pracoviště možné v budoucnu využívat na různé operace pouze s přizpůsobením upínání např. v případě obrábění polotovaru z nemagnetických materiálů a volbou vhodných nástrojů pro zajištění optimálních řezných podmínek. [29] [35]



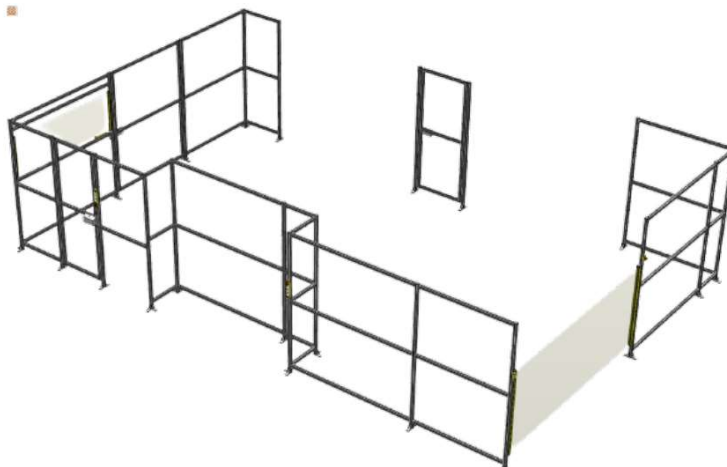
Obr. 22) CNC obráběcí stroj MCV 754 Q (vlevo) a magnetický upínač MFRS-A1-032 (vpravo)

2.5.10 Bezpečnost pracoviště

Bezpečnost robotických pracovišť obecně je velmi důležitou částí projektu již od tvorby konceptu daného pracoviště. Musí být zajištěno, aby nemohlo dojít k újmám na zdraví a škodě na majetku. Samozřejmě za předpokladu, že se bude pracoviště využívat tak, jak bylo navrženo, a jednotlivá bezpečnostní opatření se nebudou porušovat a obcházet. Bezpečnostní prvky nejsou bohužel to jediné, co tvoří celek bezpečného pracoviště. Disciplína a obezřetnost obsluhy a ostatního personálu je prvek, který doplňuje poslední díl bezpečnosti robotického pracoviště. Je nutné mít na paměti, že nedovolené obcházení bezpečnosti za účelem zvýšení produktivity nebo z důvodu obcházení nějaké chyby, může vést k fatálním následkům.

Bezpečnost se netýká pouze zamezení úrazu způsobeného nehodou, ale také následky z dlouhodobého nevhodného způsobu používání pracoviště. Proto je důležité pracoviště konstruovat tak, aby bylo pro obsluhu komfortní a ergonomické podle technik, znalostí a zkušeností. [30]

Oplocení (Obr. 23) je vybaveno bezpečnostními prvky od firmy ABB. Pracoviště disponuje čtyřmi vstupy pro personál a jedním vstupem pouze pro materiál. Dveře pro vstup do pracoviště jsou vybaveny bezpečnostními zámky Knox 2A a panelem Smile 41, který obsahuje nouzové tlačítko, tlačítko pro vytvoření požadavku na vstup do buňky a tlačítko na opětovné spuštění robotického programu. Jeden z personálních vstupů je vybaven bezpečnostní optickou závorou z řady Orion 3, která detekuje pouze celé tělo obsluhy. Materiálový vstup je pak osazen bezpečnostní optickou závorou z řady Orion 1, která je schopna detekovat již prsty a ruce obsluhy. [31]



Obr. 23) Bezpečnostní oplocení s dalšími prvky

3 PRAKTICKÁ ČÁST

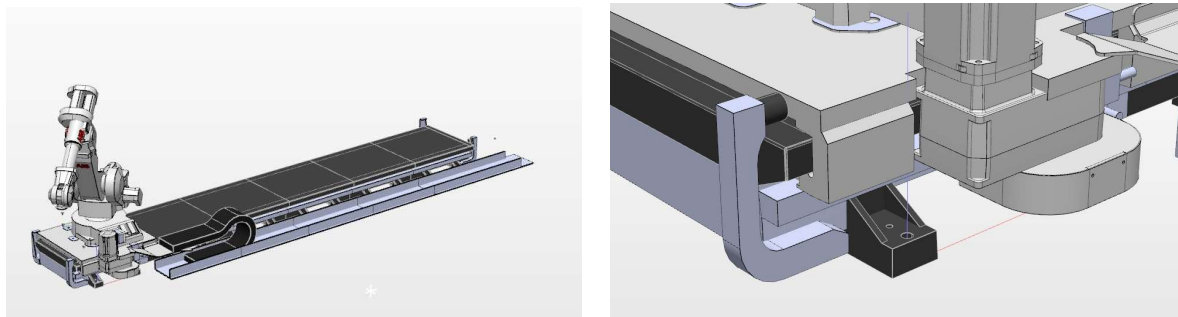
V praktické části bude popsána tvorba virtuálního pracoviště, softwaru a jeho testování. Pracoviště zpracovávané v rámci této diplomové práce se nachází v laboratoři ÚVSSR VUT v Brně. Jedná se o robotické pracoviště, které se skládá z průmyslového robotu ABB IRB 4400 umístěného na pojezdu ABB IRBT 4004, CNC soustruh SPM, CNC frézka 854 Q, stojan s nástroji, odkládací stůl, stojan s manipulovanými deskami a měřicí stanice. Celé pracoviště je chráněno před nepovoleným vstupem pomocí plotu z řady ABB Jokab a dalšími bezpečnostními prvky, také od firmy ABB. Tato diplomová práce se zabývá manipulováním ocelových desek do CNC frézky. Jednotlivé 3D modely a Smart componenty dále pouze SC bude možné použít pro další projekty a závěrečné práce v případě rozšiřování zpracovávaného pracoviště.

3.1 Sestavení virtuálního pracoviště

Motivace pro automatizaci operace zakládání ocelových desek do obráběcího stroje je následující. Pracoviště bude využito pro statistickou kontrolu procesu při různých avšak monitorovaných podmínkách. Při využití automatizace bude možné stroj provozovat v průběhu celého dne na základě požadavků z týmu pracovníků.

3.1.1 Průmyslový robot s pojezdem

Vzdálenosti mezi jednotlivými objekty robotického pracoviště jsou odměřeny z reálného stavu. Virtuální pracoviště je vytvořeno v programu RobotStudio od společnosti ABB. V tomto programu byl vytvořen nový Solution with Empty Station (Řešení s prázdnou stanicí). Nejprve byl z knihovny ABB vložen pojezd IRBT 4004, který byl osazen robotem IRB 4400 (Obr. 24 vlevo). Nulový bod souřadnic World je umístěn v prvním montážním otvoru pojezdu (Obr. 24 vpravo).



Obr. 24) Robot na pojezdu (vlevo) a umístění počátku souřadnic World (vpravo)

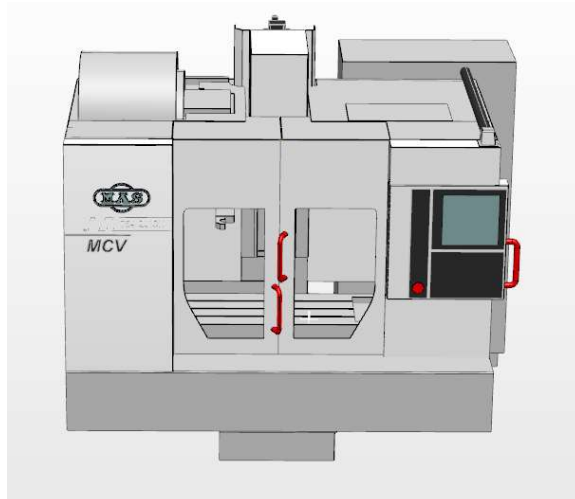
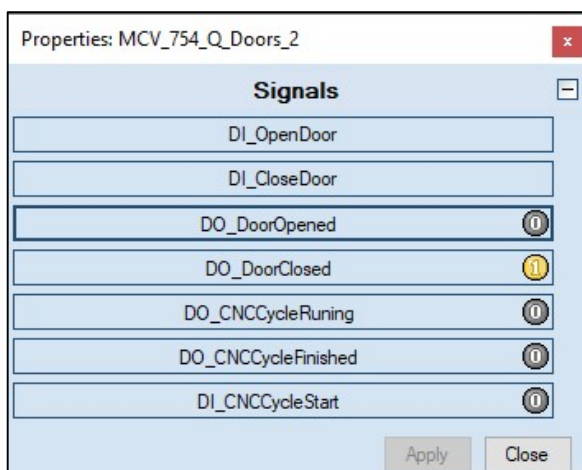
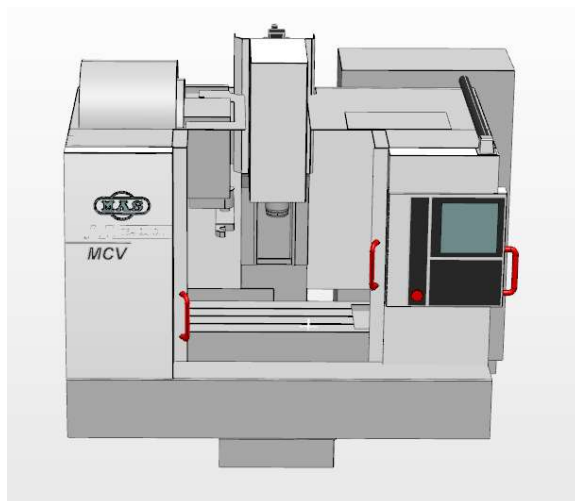
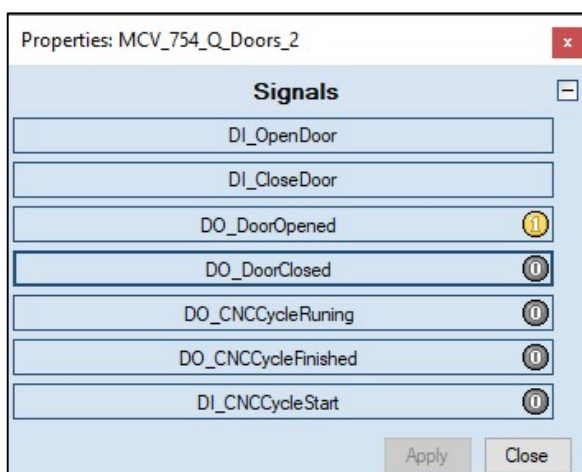
3.1.2 Stojan na nástroje

Dále je na svoji virtuální polohu umístěn stojan na nástroje. Stojan je vybaven celkem čtyřmi Line Sensory, které informují nadřazený řídicí systém o stavu v jednotlivých polohách. Rozlišujeme stavy volno a obsazeno. Stojan je také vybaven snímáním přítomnosti manipulovaného dílu na konci skluzu. V rámci této úlohy není využito, ale je zde předchystáno v případě budoucího využití.

3.1.3 Obráběcí CNC stroje

Následovalo vložení obráběcích strojů. CNC soustruh SPM 16 a CNC frézka 754 Q (Obr. 25). CNC soustruh není v rámci úlohy využíván a v pracovišti je vloženo pouze jeho model bez další grafické či jiné funkcionality. CNC frézka je nejprve vytvořena jako mechanismus, který ovládá čelní kryty stroje do polohy otevřeno a zavřeno. Oba stavy jsou monitorovány v rámci SC, do které byl mechanismus následně vložen. SC obsahuje čtyři Line Sensory, každá dvojice monitoruje stav otevřeno/zavřeno i jednoho křídla dveří. Výstupy z těchto čidel jsou poté sjednoceny pomocí hradel typu AND a v případě hodnoty logické 1 jsou obě křídla posuvných dveří buď plně otevřena, nebo plně zavřena. SC dále obsahuje dvě funkce PoseMover, které zajišťují pohyb dveří do specifikované polohy během předepsaného času. Dále je CNC vybaveno signálem pro zahájení obráběcího cyklu, monitorování jeho průběhu a signálem pro dokončení. Jedná se o důležité informace pro robot, který tak může zahájit další operace.

Magnetické upínání MFRS-A1-032 430 x 430 je součástí SC obráběcího stroje. Přijímá signál pro spuštění a vypnutí a vrací signál o svém aktuálním stavu.



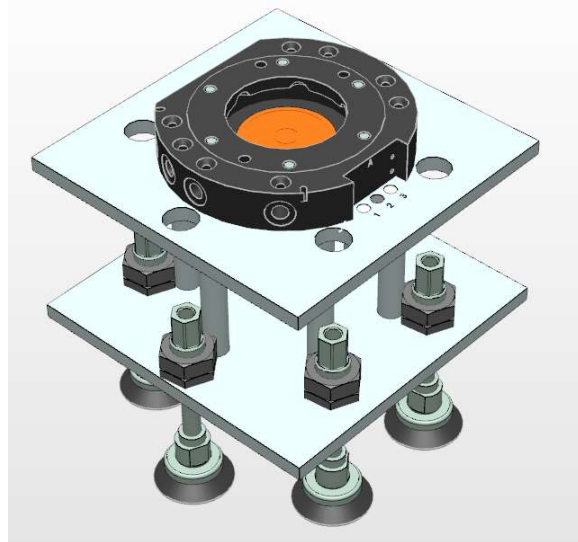
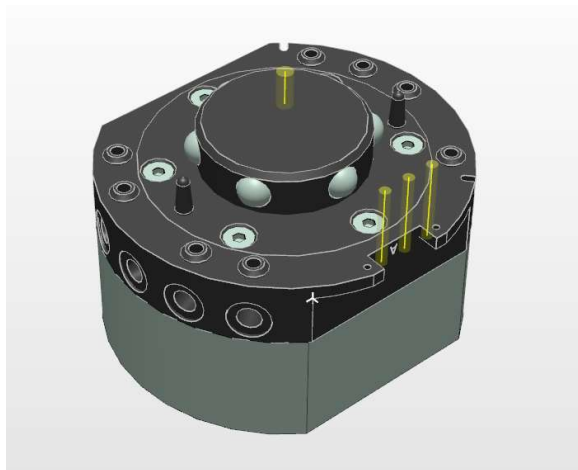
Obr. 25) Smart Component ze modelu MCV 754 Q

3.1.4 Použité nástroje

Pracoviště je celkem vybaveno třemi různými nástroji a náhradním modelem za rychloupínání Schunk SWS. V rámci této práce bude používán pouze jeden nástroj. Zbývající dva nástroje jsou vytvořeny jako rezervní pro budoucí použití a pro zachování autenticity reálného pracoviště. Nástroje s názvy Gripper_SMC_SC a Gripper_Schunk_SC jsou nejprve vytvořené jako mechanismy typu nástroj a následně vloženy do SC, které je doplnily o potřebnou funkcionalitu. Blíže jsou popsány na následující straně.

Jednotlivé nástroje jsou upínány přes rychloupínací adaptér Schunk SWS. Příruba robotu je osazena mezikusem pro montáž SWK části adaptéru. Nástroj je poté osazen SWA částí rychloupínacího adaptéru. Spojení probíhá pomocí stlačeného vzduchu, který přemístí píst do polohy zajištění. Obě polohy jsou při použití reálného adaptéru snímány pomocí indukčních snímačů. Ve virtuálním prostředí jsou tyto signály nahrazeny výstupy z funkcí Attacher a Detacher, které jsou dále zapojeny do SR logického bloku. Výsledná logická hodnota potom udává, zda je adaptér zajištěn k nástroji či nikoliv. Pomocí adaptéru je možné propojit až osm pneumatických hadic. Vnitřní mechanismus adaptéru neobsahuje přitlačnou pružinu, ale geometrie spoje zaručuje trvalé spojení i při ztrátě tlaku. Jednotlivé spojené příruby se pouze oddálí a při znovu připojení stlačeného vzduchu dojde opět ke správnému zajištění. [27]

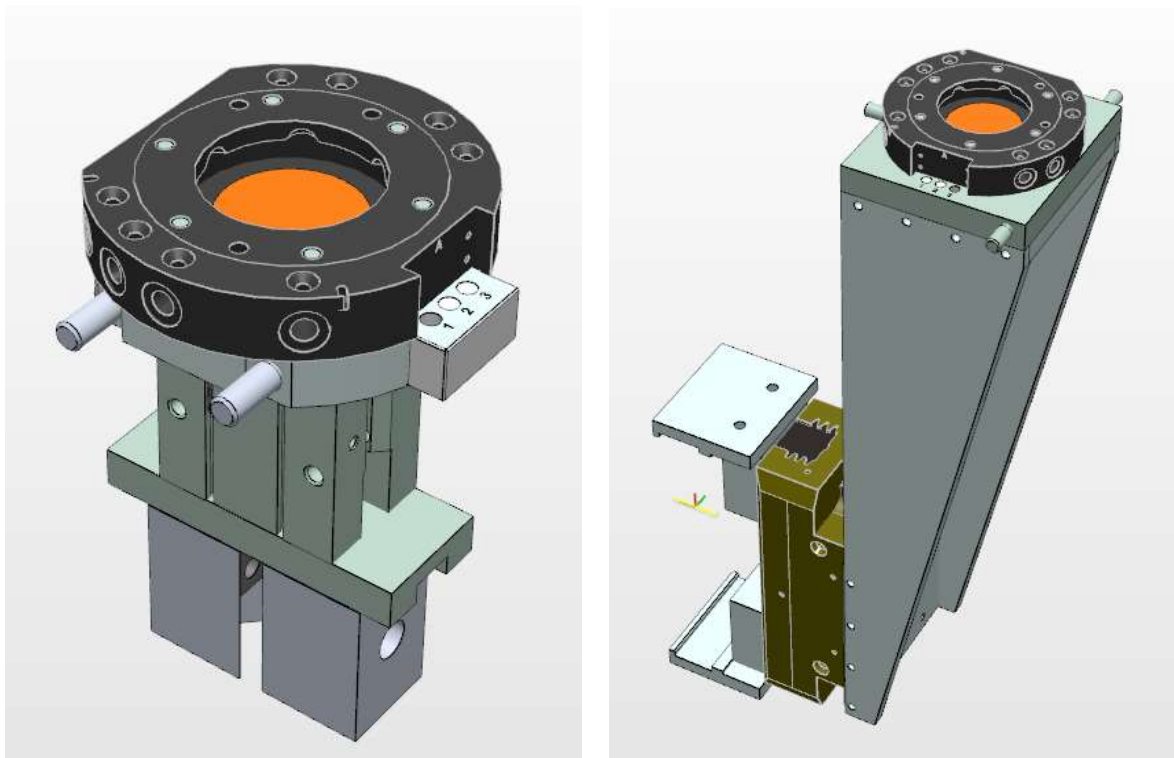
Adaptér (Obr. 26 vlevo) je dále vybaven virtuálním kódováním nástrojů. Na straně příruby SWK jsou umístěny tři Line Sensory, které zajišťují logické hodnoty v případě, že jsou v kontaktu s dalším tělesem. V protilehlé poloze na nástroji jsou vytvořeny tři pozice, které zajišťují samotné kódování. Na jedné z pozic je otvor, který zajišťuje hodnotu logická nula. Jednotlivé signály z Line Sensorů jsou zapojeny na sestavu logických hradel a na výstupu je jednoznačně určen použitý nástroj.



Obr. 26) Adaptér (vlevo) a vakuový gripper (vpravo)

Nástroj s vakuovými přísavkami (Obr. 26 vpravo) je vytvořen jako nástroj bez mechanismu, který je následně vložen do SC. V rámci SC je přidán Line Sensor do prostoru TCP (Tool Center Point), který snímá objekt, se kterým je v geometrickém průniku. Název objektu je následně použit pro funkci Attacher, kde je připojen na vstup s názvem Child. Odtud je následně vytvořeno propojení na vstup Child i funkce Detacher.

Nástroje s názvy Gripper_Schunk_SC (Obr. 27 vpravo) a Gripper_SMC_SC (Obr. 27 vlevo) jsou vytvořeny jako mechanismy typu nástroj. Tento způsob tvorby nástroje následně umožňuje využití pohybu čelistí nástroje při simulaci zprovoznování robotického pracoviště. Pro jednotlivé pohyby čelistí je možné nastavit časy přestavení. Dále jsou monitorovány stavy čelistí otevřeno a zavřeno. Tohoto je využito při tvorbě jednotlivých pohybových procedur v tom smyslu, že robot nezačne vykonávat další akci do té doby, než jsou čelisti buď otevřené, nebo zavřené. Jedná se o virtuální náhradu reálného přístupu. Oba nástroje níže opět obsahují virtuální kódování pro určení typu nástroje adaptérem a další zpracovávání v rámci programu. Stejně jako nástroj s názvem Gripper_Vacuum_SC jsou i tyto nástroje vybaveny funkcí Attacher a Detacher, které zajišťují uchopení a odložení manipulovaného předmětu určeného pomocí Line Sensoru umístěného v TCP daného nástroje.



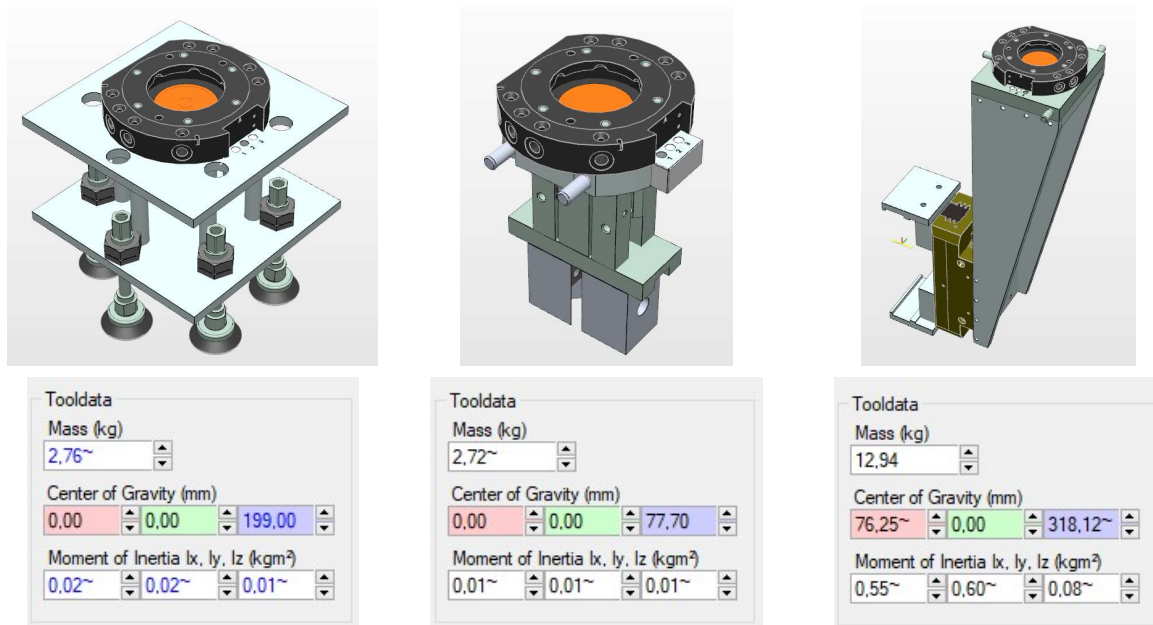
Obr. 27) Gripper s chapadlem SMC (vlevo) a Gripper s chapadlem Schunk (vpravo)

Nástroj Gripper_SMC_SC má TCP posunutý pouze v ose Z od souřadného systému pro uchycení nástroje na přírubu. Zatím co nástroj Gripper_Schunk_SC má TCP oproti počátku umístěný dle obrázku (Obr. 28) níže.

Tooldata name:					
Gripper_Schunk_1					
Belongs to Link:					
L1 (BaseLink)					
Position (mm)					
239,95	0,00	466,10			
Orientation (deg)					
0,00	90,00	0,00			

Obr. 28) Tooldata Schunk

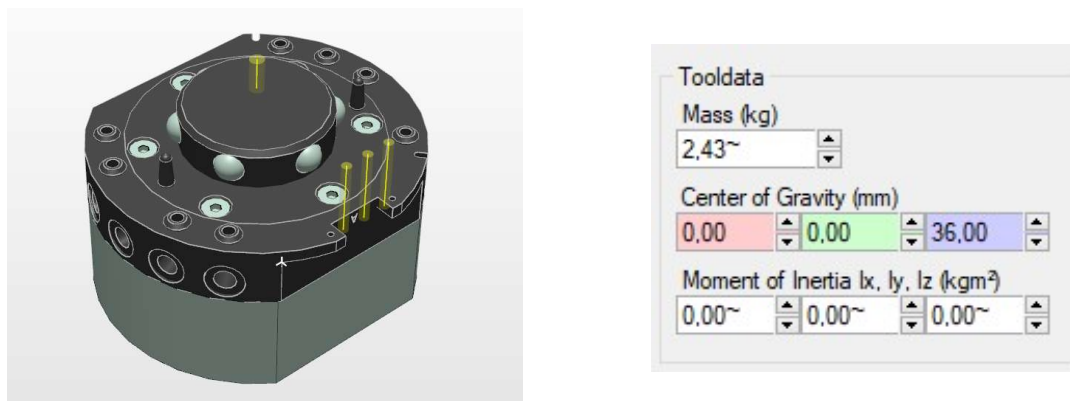
Jednotlivé nástroje (Obr. 29) jsou plně nastaveny, co se týče hmotností, polohy těžiště a osových momentů setrvačnosti pro jednotlivé osy. Správné a přesné nastavení těchto parametrů zajistí vyšší přesnost, nižší zatížení pohonů, hladší pohyby a přesné časy jednotlivých cyklů. Pokud tato data nastavena nejsou, je možné vytvářet pohybové instrukce, ale před spuštěním programu na reálném robotu musí být doplněny. Níže jsou zobrazena tooldata pro jednotlivé nástroje.



Obr. 29) Tooldata pro: Gripper Vacuum (vlevo), Gripper SMC (uprostřed) a Gripper Schunk (vpravo)

Připojovací adaptér má také nastavena tooldata (Obr. 30 vpravo), která jsou popsána v předchozím odstavci. Hodnoty osových momentů setrvačnosti jsou nejmenší ze všech použitých nástrojů, avšak hmotnost a vyložení oproti přírubě robotu na jeho šesté ose nelze zanedbat. Níže jsou zobrazena tooldata pro rychloupínací adaptér. Osové momenty setrvačnosti jsou v případě adaptéru velmi malé a rozlišení zadávacího formulářového okna hodnoty nezobrazí. Výsledné hodnoty jsou následující:

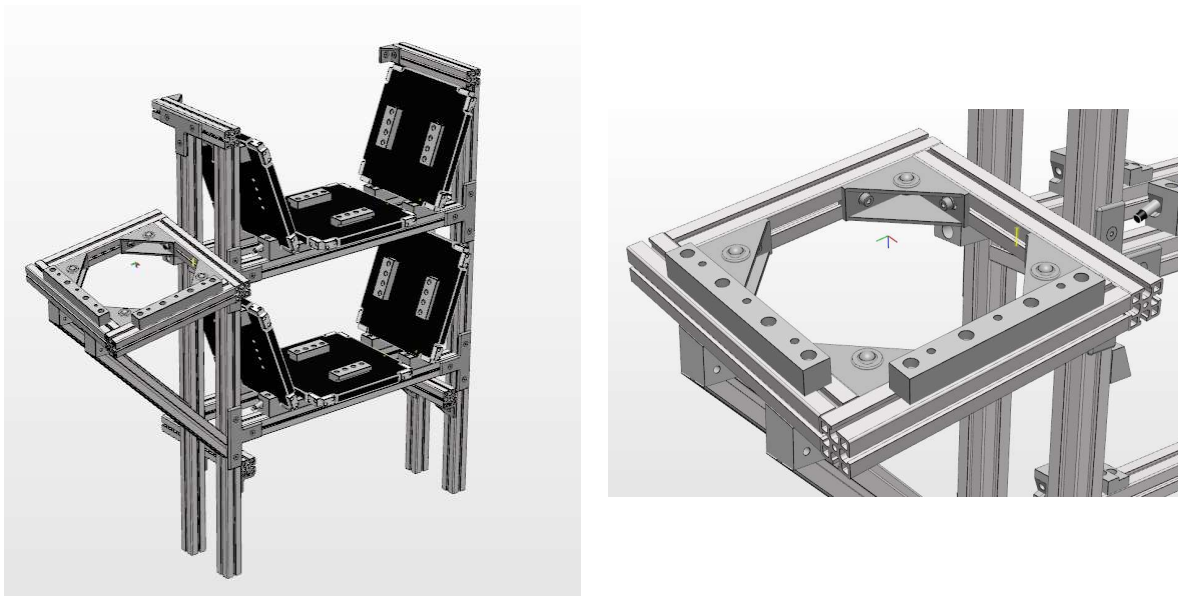
$$I_x=0,003545\text{kgm}^2; I_y=0,002975\text{kgm}^2; I_z=0,004466\text{kgm}^2.$$



Obr. 30) Adaptér (vlevo) a tooldata pro adaptér (vpravo)

3.1.5 Stojan s deskami

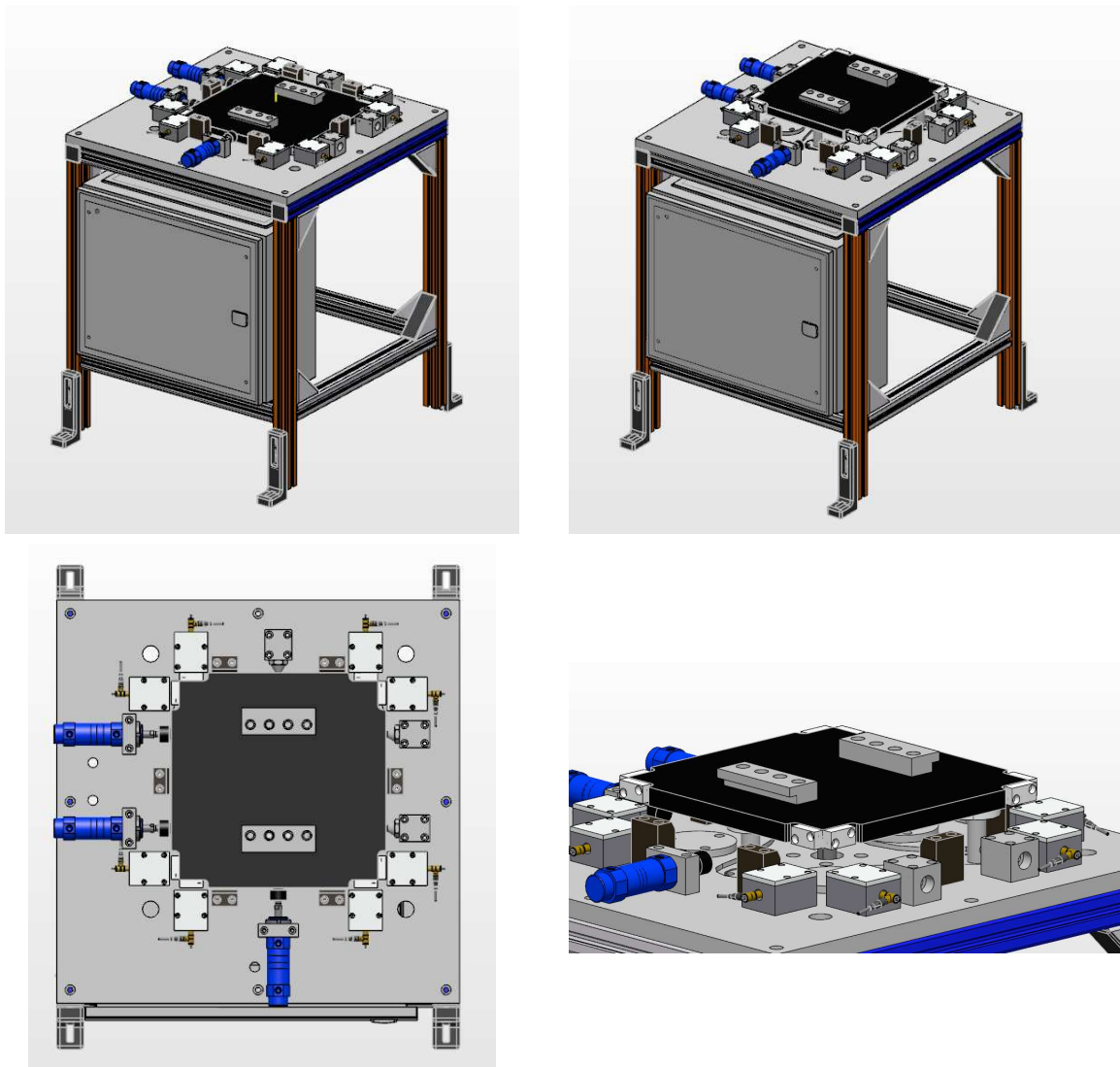
Dalším prvkem pracoviště je stojan na manipulované desky (Obr. 31 vlevo). Každá z šesti pozic obsahuje indukční snímač pro určení, zda je daná pozice obsazena nebo je volná. Stojan je v rámci virtuálního pracoviště vložen jako SC, která v tomto případě obsahuje pouze sadu sedmi Line Sensorů, které reprezentují šest indukčních snímačů na pozicích jednotlivých desek a sedmý nově navrhovaný indukční snímač na pozici skluzu. V případě reálného pracoviště pozice skluzu indukčním snímačem vybavená není. Avšak v rámci virtuálního pracoviště byl skluz Line Sensorem vybaven. Jedná se o další prvek, který zajistí správné a bezpečné fungování stanice. V reálném prostředí by totiž mohlo dojít ke stavu, kdy bude pozice skluzu obsazena a robot i tak provede sekvenci pro založení dalšího kusu. Tato situace by vedla k deformaci stojanu na desky a k možnému poškození nástroje pro manipulování s deskami. Pro založení desky do skluzu bylo nutné vytvořit robtarget, který bude skloněný ve dvou osách současně. Tohoto bylo docíleno vytvořením pomocného lokálního souřadného systému (Obr. 31 vpravo). Pro jeho polohu byl jeden z dorazových hranolů a následně byl tento SS přesunut do prostoru pro umístění manipulované desky. Vůči tomuto SS byly vytvořeny body pro příjezd a odložení desky.



Obr. 31) Stojan s deskami (vlevo) a detail skluzu s lokálním SS a Line Sensorem (vpravo)

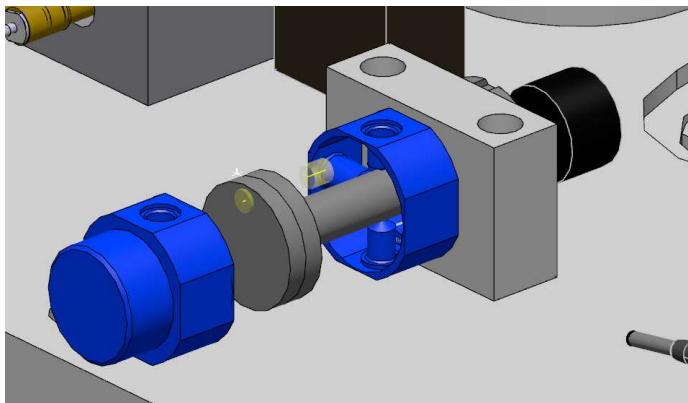
3.1.6 Měřicí stanice

Dalším prvkem virtuálního pracoviště je měřicí stanice (Obr. 32). Obrázek níže zobrazuje pracovní polohy měřicí stanice. Jedná se o polohu zakládání či vykládání desky a potom polohu, ve které je deska upnuta ve stanici, a probíhá měření. Před vysunutím desky jsou písty přítlačných válců zasunuté a po založení desky a spuštění základny s deskou se písty válců vysunou a proběhne dotlačení desky.



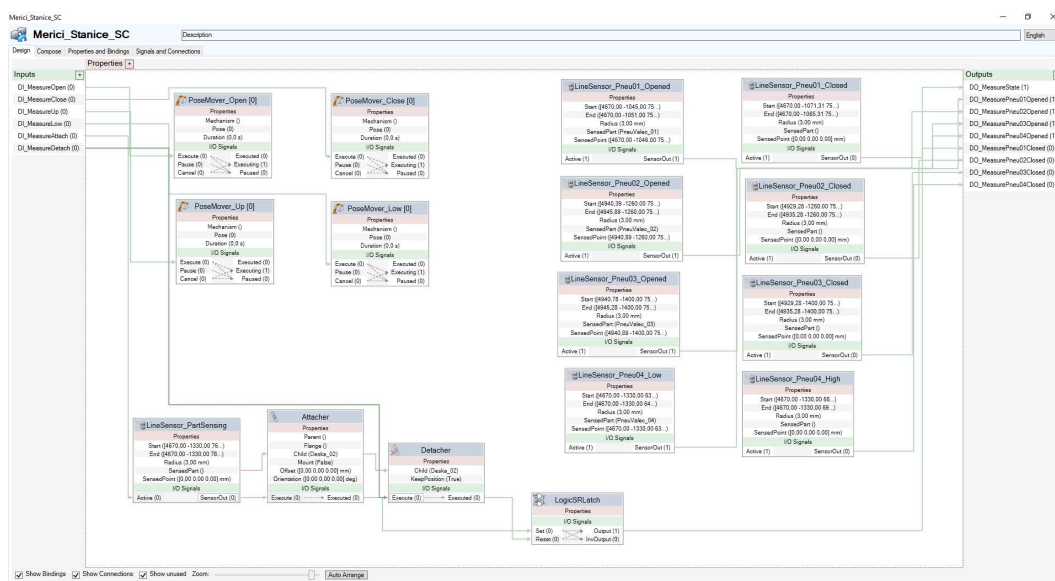
Obr. 32) Polohy měřicí stanice: Měří (vlevo), Deska může být odebrána (vpravo)

Polohy jednotlivých pístů pneumatických válců jsou monitorovány pomocí Line Sensorů umístěných uvnitř válců (Obr. 33). Na měřicí stanici v laboratoři jsou pro monitorování polohy pístu použity magnetické snímače. V rámci reálného pracoviště je monitorován pouze stav, kdy je píst pneumatického válce zasunutý. Virtuální pracoviště je vybaveno monitorováním obou poloh pístu. Máme tedy k dispozici signál otevřeno i zavřeno. Line Sensory jsou umístěny uvnitř pneumatického válce, aby nedocházelo k chybnému snímání jiných částí sestavy než právě pístu pneumatického válce.



Obr. 33) Line Sensory uvnitř pneumatické válce

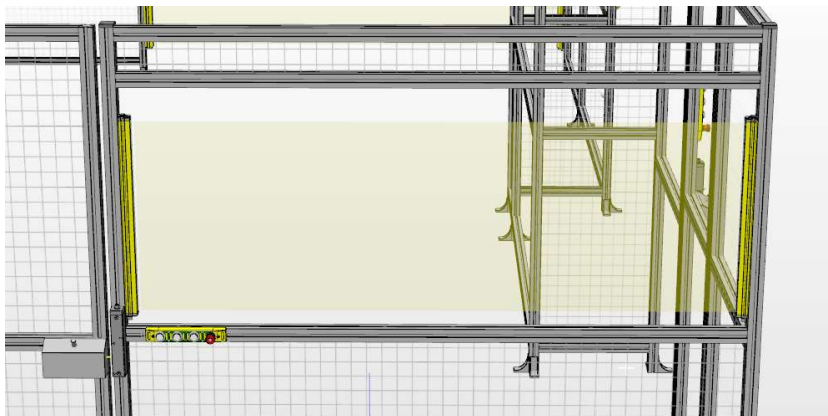
Propojení jednotlivých prvků SC je zobrazeno na obrázku (Obr. 34) níže. Jedná se o sestavu prvků PoseMover, která po obdržení impulsu na vstup s názvem Execute vykoná přesun zadaného mechanismu do dané polohy. Tímto je ovládáno otevírání a zavírání pneumatických válců. Dále zde je sestava Line Sensorů, která monitoruje polohu jednotlivých pístů pneumatických válců. A ve spodní části okna Design jsou prvky Line Sensor, Attacher Detacher a SR Latch. Tato skupina zajišťuje uchycení manipulované desky k pohyblivému stolu měřicí stanice a její zpětné uvolnění při zpětném odebrání nástrojem umístěným na robotu.



Obr. 34) SC pro měřicí stanici

3.1.7 Bezpečnostní prvky

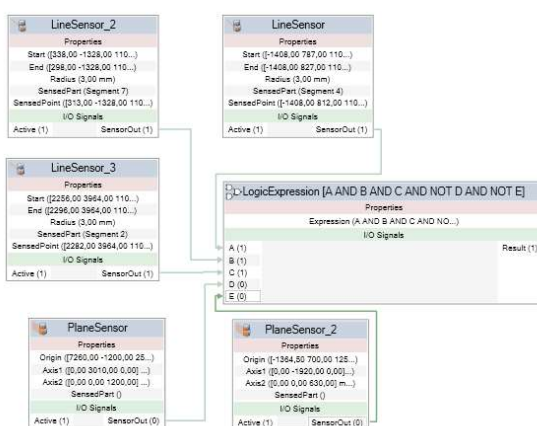
Bezpečnostní prvky robotické buňky jsou v rámci digitálního pracoviště zpracovány na základě aktuálního stavu v laboratoři FSI VUT v Brně. Je zde použito oplocení od divize ABB Jokab Safety. Model oplocení je vytvořený pomocí nástavby programu RobotStudio s názvem Equipment Builder. Použití této nástavby je uživatelsky příjemné a velice intuitivní. Bohužel nebylo možno zvolit přesný typ provedení oplocení, jako je použito v laboratoři, ale pro demonstrativní a funkční použití v rámci virtuálního pracoviště je tato varianta dostatečná.



Obr. 35) Bezpečnostní optická závora u materiálového vstupu

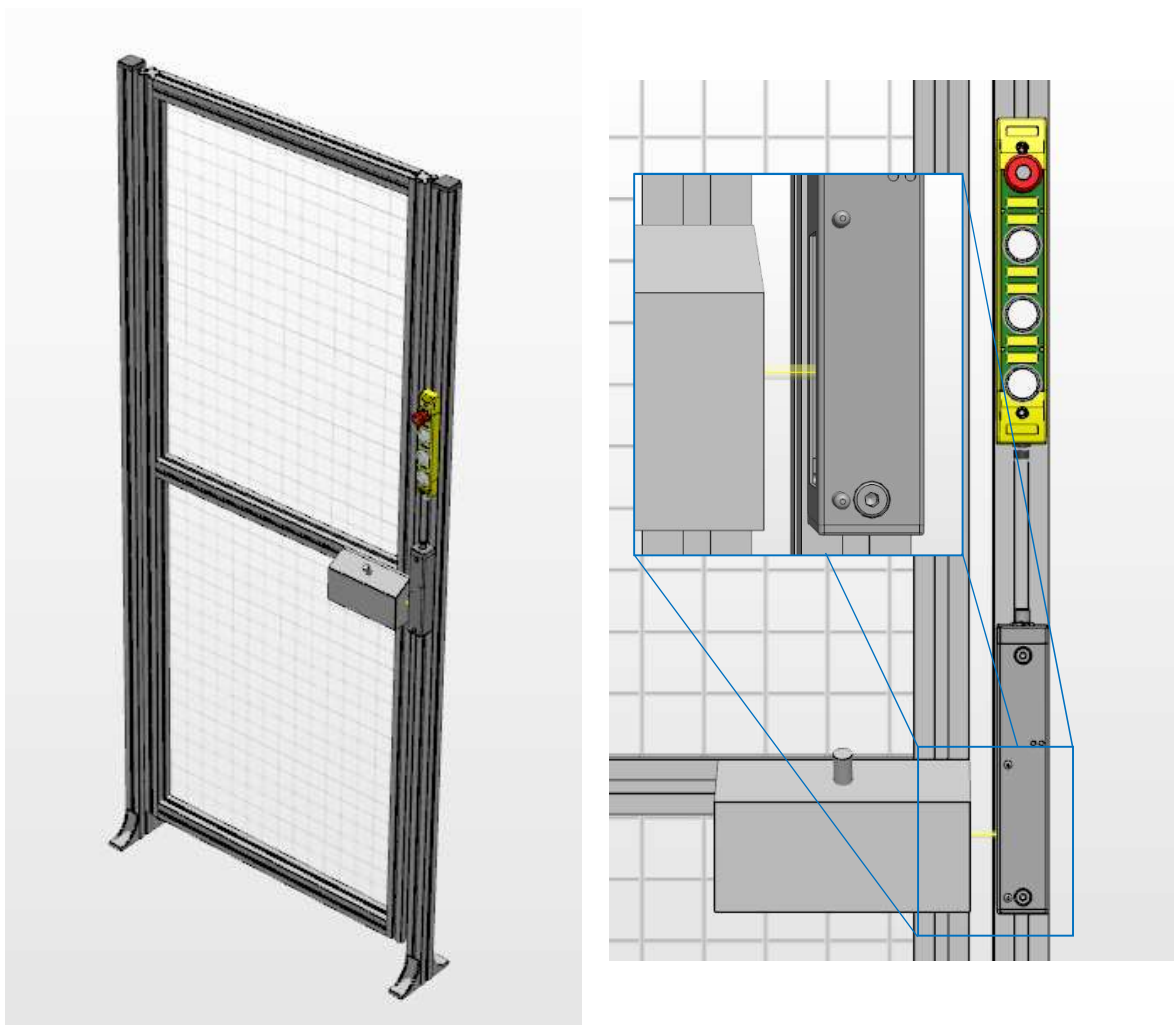
Světelné paprsky reálné bezpečnostní závory jsou v rámci virtuálního pracoviště nahrazeny pomocí prvku PlaneSensor (Obr. 35), který vytvoří snímanou oblast dle zadaných rozměrů. Vzhledem k tomu, že pro případ splnění bezpečnosti musí být prostor bezpečnostní optické závory prázdný, je nutné invertovat hodnotu logické nuly, která je na výstupu z PlaneSensoru.

Smart Component pro určení bezpečnosti na základě stavů bezpečnostních závor a zámků je zobrazena níže (Obr. 36).



Obr. 36) Smart Component pro bezpečnostní prvky

Bezpečnostní zámky Knox jsou v rámci virtuálního modelu realizovány pomocí LineSensorů (Obr. 37 vpravo), které snímají přítomnost celého plotového segmentu se dveřmi. V případě otevření dveří dojde k nesplnění bezpečnostní podmínky a probíhající operace bude zastavena. Obrázek níže ilustruje bezpečnostní prvky na zadních dveřích pro přístup do pracoviště.



Obr. 37) Celkový pohled na osazené dveře (vlevo) a detail Line Sensoru v prostoru bezpečnostní kliky (vpravo)

3.1.8 Ostatní prvky pracoviště

Pracoviště je pro názornost vybaveno i modelem řídicího systému IRC5. Model je umístěn na pozici reálného ŘS. Posledním prvkem pracoviště je pracovní stůl u materiálového vstupu. Tento stůl slouží pro odkládání ocelových kostek v případě spuštění programu pro manipulaci s kostkami. Jedná se program, který byl zpracován v rámci závěrečné práce v minulosti.

3.2 Vytvoření SW pro pracoviště a jeho otestování

Následující kapitola bude rozdělena do tří částí. První část se zabývá tvorbou SW v programu RobotStudio. Druhá část zahrnuje propojení programu RobotStudio s PLC programem TwinCAT 3 pomocí komunikačního protokolu OPC UA (Open Platform Communications – Unified Architecture). Ve třetí části je popsán postup při testování vytvořených SW. V rámci PLC programu pro řízení virtuálního pracoviště je zpracováno i HMI, které je popsáno v poslední části této kapitoly.

3.2.1 Tvorba SW v programu RobotStudio

RobotStudio umožňuje jak off-line programování s využitím virtuálním kontroléru, tak i online programování, kdy je PC přímo spojené s reálným ŘS průmyslového robotu. V případě online programování je RS možno využít spolu s FlexPendantem. Při řešení zadaného problému bylo využito pouze možnosti off-line programování. Reálné pracoviště sloužilo jako vzor, ze kterého byla využita jeho koncepce a rozmístění jednotlivých prvků pracoviště. Programování pracoviště poté probíhalo mimo prostor laboratoře.

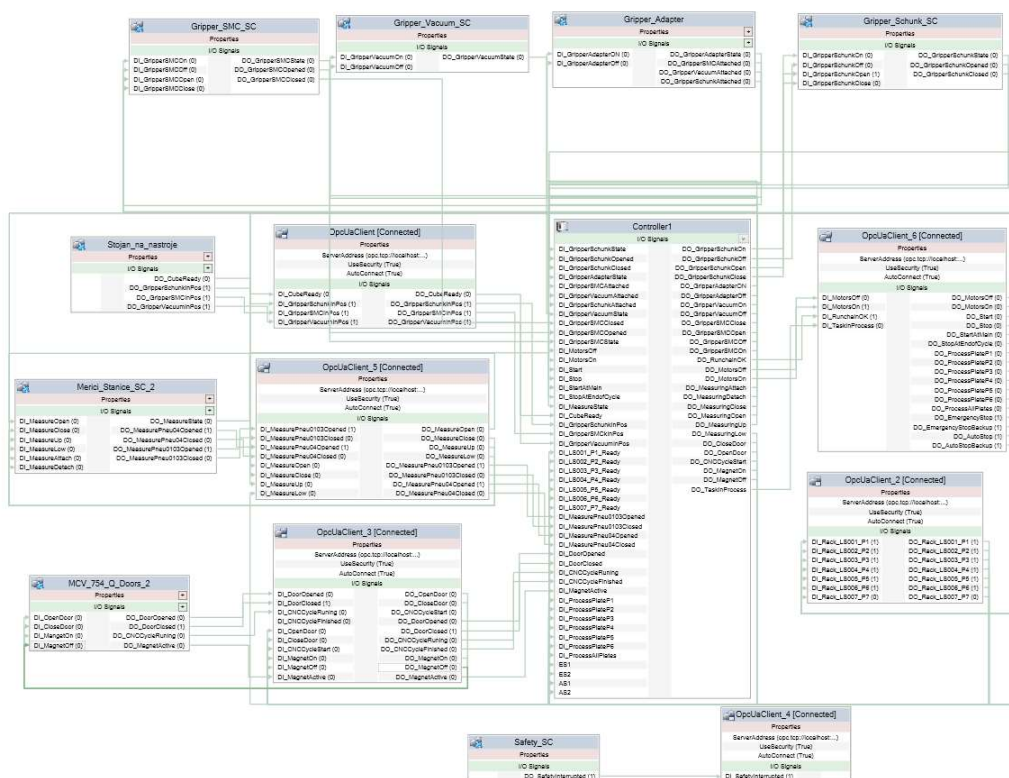
Po sestavení pracoviště z jednotlivých jeho částí bylo nutno připravit sadu vstupů a výstupů do a z virtuálního kontroléru (Obr. 38), aby bylo možno snímat a udávat povely pro jednotlivé SC. Kontrolér samotný je již v základu vybaven souborem vstupů a výstupů, které jsou využity pro řízení či čtení systémových parametrů. Jedná se např. o signály ES1 a ES2 použité pro připojení tlačítek nouzového vypnutí. Dále je zde možno číst stav motorů robotu ve smyslu spuštěno/zastaveno či varování při zvýšení jejich provozní teploty. K těmto systémovým signálům byly pomocí dialogového okna doplněny signály nutné pro virtuální zprovoznění pracoviště. Obrázek níže představuje náhled na část uživatelsky doplněných signálů. Jednotlivé signály jsou řazeny do skupin dle jejich výsledného zapojení, což umožňuje lepší orientaci v případě společné práce v rámci většího týmu a při hledání závady na virtuálním i reálném pracovišti.

Type	Name	Type of Signal	Assigned to Device	Signal Identification Label	Device Mapping	Category
Access Level	DI_GripperSMCState	Digital Input		Gripper SMC On	N/A	tool
Cross Connection	DI_GripperVacuumAttached	Digital Input		Gripper Vacuum Attached to the Gripper Adapter	N/A	tool
Device Trust Level	DI_GripperVacuumInPos	Digital Input		Gripper Vacuum in Stand and ready for pickup	N/A	ToolStand
EtherNet/IP Command	DI_GripperVacuumState	Digital Input		Gripper Vacuum On	N/A	tool
EtherNet/IP Device	DI_LS001_P1_Ready	Digital Input		Position LS001_P1 of the rack is ready	N/A	Rack
Industrial Network	DI_LS002_P2_Ready	Digital Input		Position LS002_P2 of the rack is ready	N/A	Rack
Route	DI_LS003_P3_Ready	Digital Input		Position LS003_P3 of the rack is ready	N/A	Rack
	DI_LS004_P4_Ready	Digital Input		Position LS004_P4 of the rack is ready	N/A	Rack
	DI_LS005_P5_Ready	Digital Input		Position LS005_P5 of the rack is ready	N/A	Rack
Signal Safe Level	DI_LS006_P6_Ready	Digital Input		Position LS006_P6 of the rack is ready	N/A	Rack
System Input	DI_LS007_P7_Ready	Digital Input		Position LS007_P7 of the rack is ready	N/A	Rack
System Output	DI_MagnetActive	Digital Input		Magnetic Chuck Active	N/A	CNC
	DI_MeasurePneu04Closed	Digital Input		Measuring Station in Measuring Position	N/A	MeasuringStation
	DI_MeasurePneu04Opened	Digital Input		Measuring Station in Loading Position	N/A	MeasuringStation
	DI_MeasurePneu0103Closed	Digital Input		Measuring Station Locking is Closed	N/A	MeasuringStation
	DI_MeasurePneu0103Opened	Digital Input		Measuring Station Locking is Opened	N/A	MeasuringStation
	DI_MeasureState	Digital Input		Digital Signal for reading status of the Measuring Station	N/A	MeasuringStation
	DI_MotorsOff	Digital Input		Robot motors stops	N/A	SystemInput
	DI_MotorsOn	Digital Input			N/A	SystemInput
	DI_ProcessAllPlates	Digital Input		Task for Process All Plates at Once	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP1	Digital Input		Task for Process Plate P1	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP2	Digital Input		Task for Process Plate P2	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP3	Digital Input		Task for Process Plate P3	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP4	Digital Input		Task for Process Plate P4	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP5	Digital Input		Task for Process Plate P5	N/A	Task
	DI_ProcessPlateP6	Digital Input		Task for Process Plate P6	N/A	Task
	DI_Start	Digital Input		Start of the program	N/A	SystemInput
	DI_StartAtMain	Digital Input		Start at main signal input	N/A	SystemInput
	DI_Stop	Digital Input		Robot stops	N/A	SystemInput
	DI_StopAtEndOfCycle	Digital Input		Robot stops at end of cycle	N/A	SystemInput
	DO_CloseDoor	Digital Output		Close the door of MCV	N/A	MCV
	DO_CNCcycleStart	Digital Output		CNC cycle start	N/A	CNC
	DO_GripperAdapterOff	Digital Output		Activates the Gripper Adapter Detacher	N/A	tool
	DO_GripperAdapterOn	Digital Output		Activates the Gripper Adapter Attacher	N/A	tool
	DO_GripperSchunkClose	Digital Output		Activate Close in Schunk Gripper Mechanism	N/A	tool
	DO_GripperSchunkOff	Digital Output		Activate Detacher in Schunk Gripper	N/A	tool
	DO_GripperSchunkOn	Digital Output		Activate Attacher in Schunk Gripper	N/A	tool
	DO_GripperSchunkOpen	Digital Output		Activate Open in Schunk Gripper Mechanism	N/A	tool
	DO_GripperSMCClose	Digital Output		Activate Close in SMC Gripper Mechanism	N/A	tool
	DO_GripperSMCOff	Digital Output		Activate Detacher in SMC Gripper	N/A	tool

Obr. 38) Signály pro zprovoznění virtuálního pracoviště

Dále bylo ze systému využito několik již připravených signálů pro ovládání pracoviště vzdáleně z PLC programu.

Systémové a nově vytvořené signály jsou propojeny s ostatními SC v části RS s názvem Station Logic (Obr. 39). Zde jsou zobrazeny jednotlivé SC z celého pracoviště a toto prostředí slouží pro jejich propojení. S nadsázkou by šlo říct, že se jedná o drátování virtuálního pracoviště. Zde je vhodné upozornit na možnost špatného propojení vstupu a výstupu daného signálu. Během testování programu jsem čelil situaci, kdy jedna ze SC nepracovala, jak by měla. Vzhledem k možnosti zobrazení jednotlivých signálů v samostatném okně programu bylo lokalizováno místo špatného zapojení signálu a následně daná SC již vykonávala svoji funkci. Obrázek níže představuje finální propojení pracoviště.

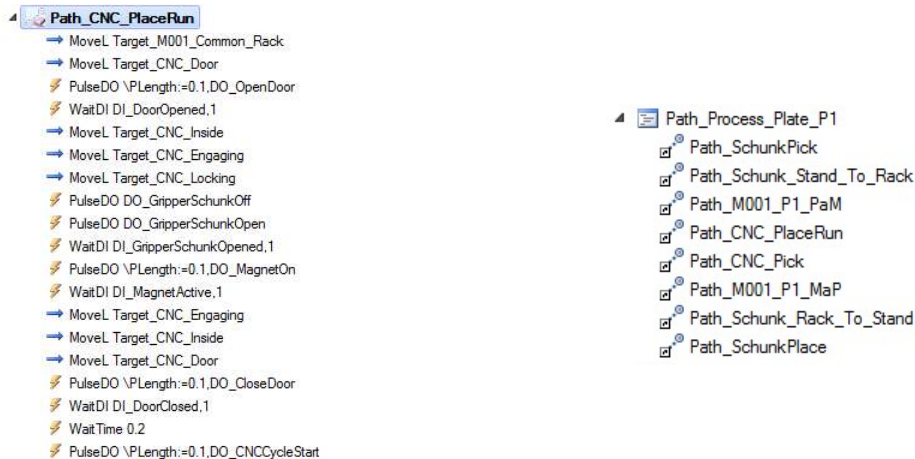


Obr. 39) Station Logic virtuálního pracoviště

Srdce (středobod) celého pracoviště je kontrolér, který zajišťuje tok informací ve směru z a do jednotlivých Smart Component. Na první pohled se zdá, že je zapojení zmatečné a není možno určit trasu propojení, ale po vybrání jedné z tras dojde ke zvětšení její šířky a propojení je patrné. Bez této sestavy by nebylo možno sestavit program, který se bude skládat z více než pouze z průmyslového robota případně umístěného na pojezdu. Pro správnou funkci je důležité správně specifikovat, jaký signál je pro kontrolér vstupní a jaký následně výstupní.

Následuje tvorba drah robotu. Při této činnosti jsem postupoval z místa, které přesně určuje místo pro njetí nástroje umístěného na přírubě robota. V tomto místě byl vytvořen Target a v případě nutnosti byl vhodně přeorientován, aby jeho natočení korespondovalo s TCP daného nástroje. V programu jsou tyto body souhrnně nazývané Locking. Tento název popisuje danou polohu jako místo pro připojení případně odložení manipulovaného dílu v rámci dané dráhy. Dále byly vytvořeny body, které při pohybu robota slouží pro bezpečné a pomalé přiblížení nástroje nebo jeho oddálení. Tyto body jsou souhrnně nazývané Engaging ve smyslu spojování. Následují specifické body pro dané prvky pracoviště. Místa v blízkosti jednotlivých objektů jsou nazývána Common ve smyslu společná.

Po vložení prvku Empty Path je do něho možno přesunout požadované Targety a vytvořit tím pohybovou instrukci. V závislosti na povaze polohy jednotlivých bodů je nutno nastavit hodnoty pro parametry rychlosti, velikosti zóny a typ použitého nástroje. Pro správnou polohu jednotlivých kloubů robotu je nutno nastavit konfiguraci os pro každý Target. Je také možno využít možnosti *Auto Configuration*, která dále dává na výběr ze dvou možností. *Linear/Circular Move Instruction* a *All Move Instruction*. V tuto chvíli je daná dráha nastavená, co se týče pohybových instrukcí. Nyní je však nutno k dráze přidat *Action Instructions*, které budou zajišťovat potřebné signály pro simulaci celé procedury. Následující obrázek (Obr. 40) je příklad kompletní instrukce, která se skládá z pohybové a signální části.



Obr. 40) Pohybová procedura pro založení desky do CNC OS (vlevo) a soubor všech potřebných procedur pro zpracování jedné desky (vpravo)

Z obrázku je dále patrná vlastní hodnota doby pulzu digitálního signálu. Tato úprava je nutná z důvodu zajištění správné komunikace mezi OPC Client na straně RS a OPC Server na straně TwinCAT. V případě, že není doba pulzu prodloužena, správné přečtení úrovně signálu na straně PLC je sporadické. Následuje vložení Empty Path a přejmenování na *main (entry point)*. Do této procedury je možné vkládat jednotlivé dílčí pohybové procedury a pomocí funkce *Synchronize to RAPID* převést do jazyka RAPID (Obr. 41). Nyní je proceduru možné spustit pomocí spuštění simulace. Tímto způsobem byly nejprve ověřeny všechny procedury na straně RS. Tím došlo k eliminaci problémů způsobených špatnou komunikací mezi RS a TwinCAT. Z ověřených procedur byly poskládány kompletní operace, které jsou volány z PLC.

```
PROC Path_M001_P4_PaM()
  WaitDI DI_LS001_P1_Ready,1;
  MoveL Target_M001_Common_Rack,v100,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_M001P4_1,v150,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_LS004P4_Engaging,v100,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  PulseDO DO_GripperSchunkOpen;
  WaitDI DI_GripperSchunkOpened,1;
  MoveL Target_LS004P4_Locking,v30,z100\Inpos:=Inpos50,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  PulseDO DO_GripperSchunkOn;
  PulseDO DO_GripperSchunkClose;
  WaitDI DI_GripperSchunkClosed,1;
  MoveL Target_LS004P4_Engaging,v100,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_M001P4_1,v150,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_M001_Common_Rack,v150,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_M001_Common_Slide,v200,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  WaitDI DI_LS007_P7_Ready,0;
  MoveL Target_Slide_Engaging,v150,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_Slide_Locking,v40,z100\Inpos:=Inpos50,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  PulseDO DO_GripperSchunkOff;
  PulseDO DO_GripperSchunkOpen;
  WaitDI DI_GripperSchunkOpened,1;
  MoveL Target_Slide_Centering,v40,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_Slide_ReLocking,v40,z100\Inpos:=Inpos50,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  PulseDO DO_GripperSchunkOn;
  PulseDO DO_GripperSchunkClose;
  WaitDI DI_GripperSchunkClosed,1;
  MoveL Target_Slide_Engaging,v100,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_Slide_Measuring_Common,v150,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
  MoveL Target_Slide_Measuring_Engaging,v50,z100,Gripper_Schunk_1\Wobj:=wobj0;
```

Obr. 41) Část procedury v jazyce RAPID

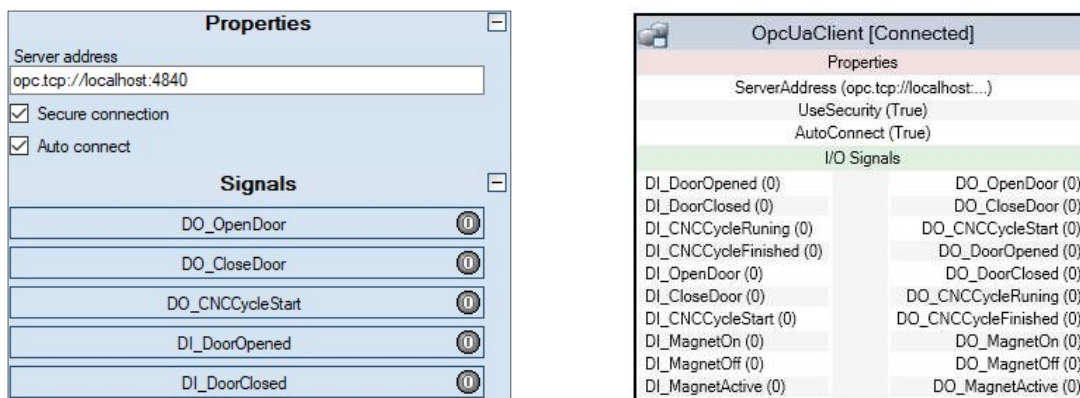
Následuje nastavení jednotlivých SC pro komunikaci přes OPC. Při vykonávání těchto postupů je nutné využívat data, která jsou nastavena v rámci projektu v TwinCAT. Avšak v této práci budou popsána v rámci této kapitoly. V opačném případě by popis postupu byl značně zmatený.

Pro správné nastavení SC OPC UA Client je nutné provést import konfiguračního souboru (Tab. 2). Jedná se o soubor formátu *.csv. Soubor obsahuje informace o jednotlivých proměnných. V prvním sloupci je specifikovaná hodnota pro NamespaceUri, která určuje zdroj a cíl pro jednotlivé signály v rámci Connectivity projektu v TwinCAT. Druhý sloupec specifikuje datový typ identifikátoru. Ve všech případech se jedná o hodnotu String. Ve třetím sloupci jsou vyplněny názvy identifikátorů. Jedná se o název listu s globálními proměnnými následovaný tečkou a poté samotný název dané proměnné. Čtvrtý sloupec specifikuje, zda se jedná o vstupní či výstupní signál. Jedná se o pokyny v rámci SC OPC UA na straně programu RS. Write – výstupní signál z kontroléru je vstupním signálem pro SC OPC UA a vyžaduje právo zápisu. Read – výstupní signál z PLC, který je následně přiveden na vstup kontroléru. Pátý sloupec specifikuje název signálu, který bude viditelný v rámci SC a poslední sloupec představuje datové typy použité pro jednotlivé proměnné.

Tab. 2) Ukázka konfiguračního souboru

NamespaceUri	IdentifierType	Identifier	ReadWrite	Signal	SignalType
urn:BeckhoffAutomation:Ua:PLC1	String	GVL_OPCUA.DO_OpenDoor	Read	DO_OpenDoor	Digital
urn:BeckhoffAutomation:Ua:PLC1	String	GVL_OPCUA.DO_CloseDoor	Read	DO_CloseDoor	Digital
urn:BeckhoffAutomation:Ua:PLC1	String	GVL_OPCUA.DO_CNCCycleStart	Read	DO_CNCCycleStart	Digital

Po importu konfigurace do prázdné OPC UA SC je možné propojit jednotlivé její signály s kontrolérem a dalšími SC, které pracují s těmito signály. Ve vlastnostech SC je dále nutné povolit možnost Auto connect (Obr. 42 vlevo), která zajistí automatické připojení po výpadku spojení. Během běžící simulace je možné sledovat stavy jednotlivých signálů. Tímto způsobem jsem během testování programu odhalil místo špatného propojení jednoho z použitých signálů.



Obr. 42) OPC UA Smart Component. Vlastnosti SC (vlevo) a zobrazení SC v rámci Station Logic (vpravo)

Tento krok je poslední na straně aplikace RS. Dále se bude jednat o odstraňování nepřesností a chyb v programu, které budou zjištěny během testování.

Obrázek (Obr. 43) popisuje vývojový diagram hlavního programu Main, který je spuštěn v SW RobotStudio. Program je složen z *IF* smyček. Nejprve je *IF* smyčka, která je spuštěna po obdržení signálu *DI_StartAtMain* úrovně high. Uvnitř této smyčky jsou následně vloženy další funkce *if*, které jsou spouštěny high úrovní jednotlivých signálů. Procedury pro provedení požadované procedury s deskou jsou voleny z uživatelského prostředí. Po volbě dané operace je signál *DO_TaskInProgress* nastaven na high a je spuštěno vykonávání zvolené procedury. Po ukončení procedury je signál *DO_TaskInProgress* nastaven na hodnotu low a smyčka je ukončena. V případě, že není zvolena další operace, robot zůstává v poloze ukončení předchozí operace, která se nachází u stojanu s nástroji.

```
PROC main()

IF DInput (DI_StartAtMain) = high THEN
  IF DInput (DI_ProcessPlateP1) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P1;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP2) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P2;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP3) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P3;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP4) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P4;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP5) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P5;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP6) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P6;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

  IF DInput (DI_ProcessPlateP6) = high THEN
    SetDo DO_TaskInProgress, high;
    Path_Process_Plate_P6;
    SetDo DO_TaskInProgress, low;
  ENDIF

ENDIF
```

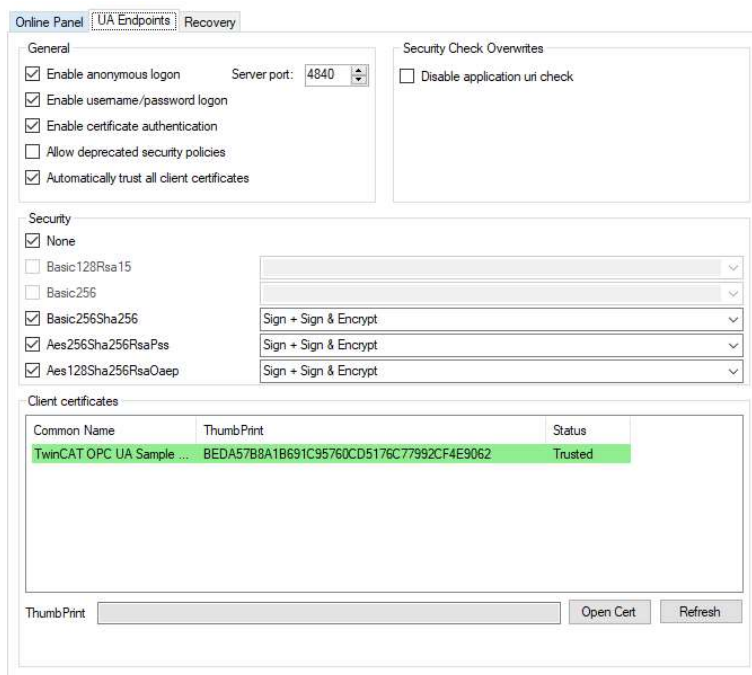
Obr. 43) Procedura Main v kódu RAPID

3.2.2 Tvorba SW v programu TwinCAT 3

V rámci druhé části tvorby SW pro pracoviště je zpracován PLC program, který zpracovává výstupní signály z kontroléru a posílá signály na jeho vstupy. Komunikace je možná díky OPC UA, kterými jsou oba programy vybaveny. Tento způsob komunikace značně zjednodušuje realizaci propojení. Následuje popis postupu sestavení komunikačního rozhraní.

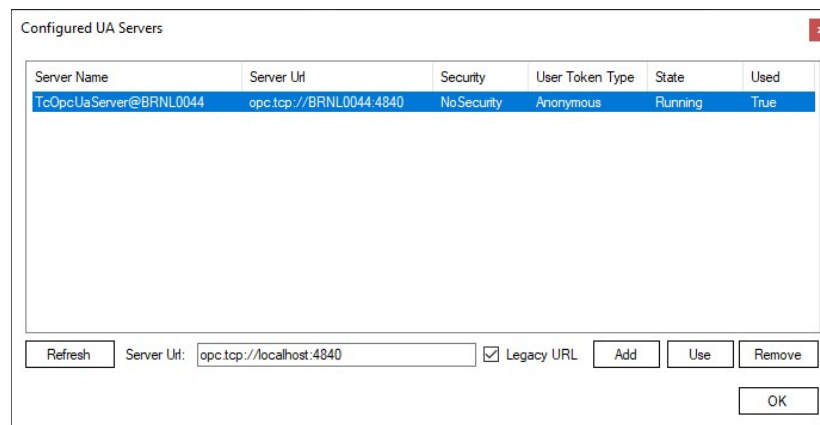
V SW TwinCAT 3 vytvoříme řešení a vložíme do něj tři projekty. *TwinCAT PLC Project*, *TwinCAT Connectivity Project* a *TwinCAT HMI Project*. Do TwinCAT PLC projektu vložíme Standard PLC Project. V PLC projektu do složce GVLs byl vložen Global Variable List. V rámci této globální knihovny bylo nutno specifikovat všechny proměnné, které budou použity pro ovládání virtuálního pracoviště. Před každou proměnnou použitou pro přenos přes OPC UA je nutno vložit komentář `{attribute 'OPC.UA.DA' := 'I'}`. Takto specifikovaná globální proměnná bude zpracovávána při OPC UA komunikaci mezi PLC a virtuálním modelem pracoviště.

Do projektu TwinCAT Connectivity nejprve vložíme TwinCAT OPC-UA Server Project. Následně do prvku Data Acces vložíme Device Type. Zde je nutno nastavit hodnotu řádku Ads Port na 851. Jedná se o číslo portu, které je specifikované v PLC Projektu. Tímto je zajištěné provázání mezi PLC Projektem a OPC UA Serverem. U OPC UA Serveru byl nastaven Server Port na hodnotu 4840. Dále byla povolena možnost anonymního přihlašování a v rámci bezpečnosti byla povolena možnost – žádná (Obr. 44). V případě potřeby je možné specifikovat různé způsoby šifrování komunikace.



Obr. 44) Nastavení přihlašování k OPC UA Serveru

Nyní je nutno provést konfiguraci OPC UA Serveru (Obr. 45). Server Url bylo nastaveno na: `opc.tcp://localhost:4840`. Následně je nutno provést kontrolu stavu serveru. Pro spuštění komunikace je nutno, aby stav serveru byl na hodnotě Running. Nyní je možno se k serveru připojit.



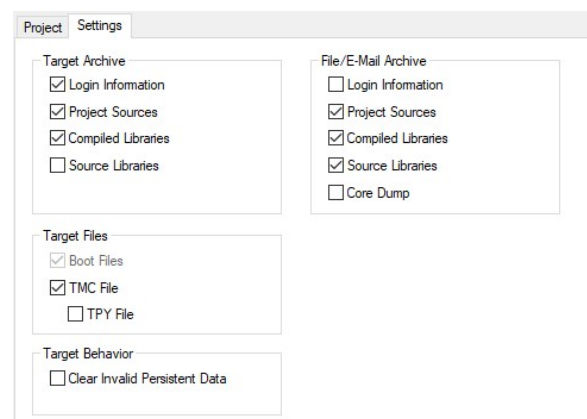
Obr. 45) Nastavení OPC UA Serveru

V rámci výchozího stavu OPC UA Server naváže spojení během prvního PLC runtime na lokálním systému a je využito odpovídajícího souboru pro vytvoření tzv. *namespace*. Pro přístup k souboru musí být nastavena možnost Target File na TMC File (Obr. 46 vpravo). [33].

```

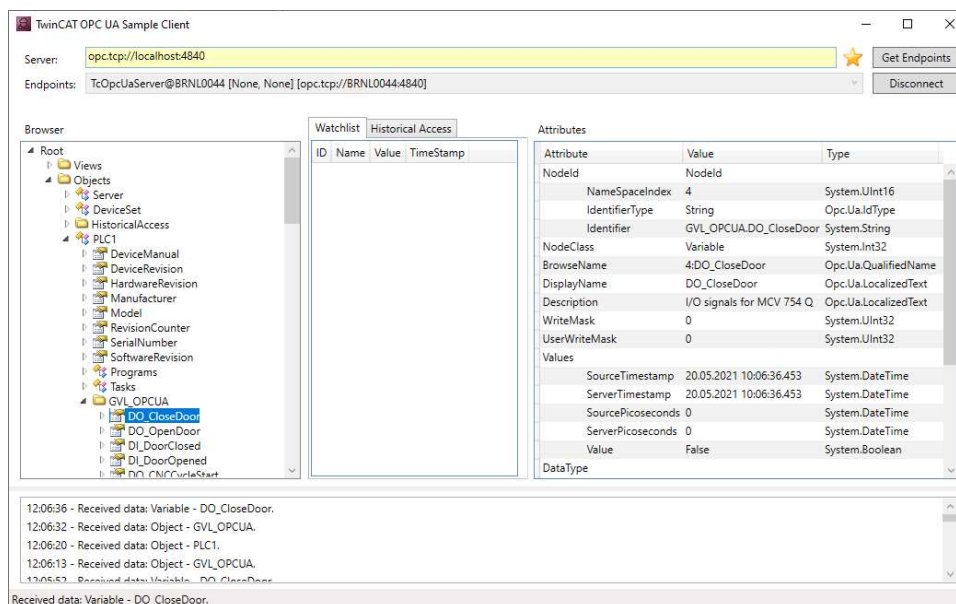
VAR GLOBAL
  (*I/O signals for MCV 754 Q*)
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DO_CloseDoor : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DO_OpenDoor : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DI_DoorClosed : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DI_DoorOpened : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DO_CNCCycleStart : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DI_CNCCycleRunning : BOOL;
  {attribute 'OPC.UA.DA' := '1'}
  DI_CNCCycleFinished : BOOL;

```



Obr. 46) Příklad zapsání globálních proměnných (vlevo) a nastavení PLC projektu (vpravo)

Pro ověření funkce serveru je možné využít program Sample Client, který je součástí balíčku TF6100 TwinCAT 3 OPC UA. Po spuštění programu je vyplněna adresa serveru a zvolena možnost Get Endpoints. Z rolovacího seznamu je následně vybrán požadovaný koncový bod a zvolena možnost Connect. V prohlížeči na levé straně je ve složkách Objects → PLC1 → GVL_OPCUA možné vidět jednotlivé globální proměnné použité v rámci PLC projektu (Obr. 47). Jednotlivé hodnoty v části atributy jsou použity pro tvorbu *.csv souboru, jehož použití je popsáno na konci kapitoly Tvorba SW v programu RobotStudio.



Obr. 47) Sample Client - náhled

Po oživení komunikace mezi TwinCAT a RS bylo nutné vytvořit PLC program, který se bude starat o virtuální pracoviště. Jedná se především o volání operací a základní požadavky co se týče bezpečnosti pracoviště.

Vytvořený PLC program využívá jednotlivé vstupy z virtuálního pracoviště a na základě jejich signálové úrovně upravuje svoje výstupy, jedná se například o přítomnost manipulované desky ve stojanu či informace o stavu obráběcího cyklu CNC frézky.

PLC program je v rámci jedné Program Organization Unit rozdělen do bloků, které představují jednotlivé prvky virtuálního pracoviště. V každém takovém bloku je sada instrukcí, která zajišťuje chod pracoviště. [34].

Archiv s PLC programem je součástí příloh této DP.

Příklad pro blok, který obsluhuje obráběcí stroj, je znázorněn na obrázku níže (Obr. 48). Na základě výstupních signálů z kontroléru jsou prováděny jednotlivé podmínky, které zajišťují obsluhu CNC obráběcího stroje robotem. Jsou zde instrukce pro otevírání a zavírání dveří spolu s informací o aktuálním stavu. Aktivace a deaktivace magnetického upínače a také informace o jeho aktuálním stavu. Po obdržení signálu pro zahájení obráběcího cyklu se spustí časovač, který je v rámci simulace nastaven pouze na 10s. Během běhu obráběcího cyklu je na HMI aktivován indikátor, aby bylo lépe poznat, v jakém stavu obráběcí stroj aktuálně je. Po uplynutí obráběcího cyklu je časovač resetován a do robotu je odeslán signál o dokončení obráběcí operace. V případě použití PLC SW na reálném pracovišti by bylo nutné pro dokončení operace snímat kód M30 a signál pro spouštění programu odesílat do obráběcího stroje nikoliv do časovače.

```

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// MCV Control
////////////////////////////////////

//Open Door CNC

IF GVL_OPCUA.DI_OpenDoor THEN
    GVL_OPCUA.DO_OpenDoor := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_OpenDoor := FALSE;
END_IF

//CNC Door Opened

IF GVL_OPCUA.DI_DoorOpened THEN
    GVL_OPCUA.DO_DoorOpened := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_DoorOpened := FALSE;
END_IF

//Close CNC Door

IF GVL_OPCUA.DI_CloseDoor THEN
    GVL_OPCUA.DO_CloseDoor := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_CloseDoor := FALSE;
END_IF

//CNC Door Closed

IF GVL_OPCUA.DI_DoorClosed THEN
    GVL_OPCUA.DO_DoorClosed := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_DoorClosed := FALSE;
END_IF

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Magnetic Chuck On
////////////////////////////////////

IF GVL_OPCUA.DI_MagnetOn THEN
    GVL_OPCUA.DO_MagnetOn := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_MagnetOn := FALSE;
END_IF

//Magnetic Chuck Off

IF GVL_OPCUA.DI_MagnetOff THEN
    GVL_OPCUA.DO_MagnetOff := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_MagnetOff := FALSE;
END_IF

//Magnetic Active

IF GVL_OPCUA.DI_MagnetActive THEN
    GVL_OPCUA.DO_MagnetActive := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_MagnetActive := FALSE;
END_IF

//CNC Cycle Runing

fbSR(set1:=GVL_OPCUA.DI_CNCCycleStart,RESET:=GVL_OPCUA.DO_CNCCycleFinished);
fbCNCCycleTime(IN:=fbSR.Q1,PT:=T#10S);

fbPulseCycleFinish(IN:=fbCNCCycleTime.Q,PT:=T#2S);

IF fbPulseCycleFinish.Q THEN
    GVL_OPCUA.DO_CNCCycleFinished := TRUE;
ELSE
    GVL_OPCUA.DO_CNCCycleFinished := FALSE;
END_IF

```

Obr. 48) Část PLC programu pro ovládání CNC frézky

3.2.3 Testování SW pro virtuální pracoviště

Testování robotického pracoviště v rámci virtuálního zprovoznění je velice důležitou činností, která svým provedením přispívá pro zkrácení doby fyzické realizace pracoviště. Vytvořený program digitálního pracoviště nejprve načte stav daného prvku a až následovně vykoná předepsanou pohybovou instrukci. Toto řešení zamezuje situacím, kdy by se robot rozjel na určené souřadnice i přes to, že by zařízení nebylo ještě připraveno k vykonání dané úlohy. V případě měřicí stanice robot přijede na bod, který je umístěný nad bodem pro odložení desky na platformu měřicí stanice vyšle do PLC signál pro zdvih této platformy a čeká, dokud nedostane zpět informaci o možnosti založit manipulovanou desku do měřicí stanice.

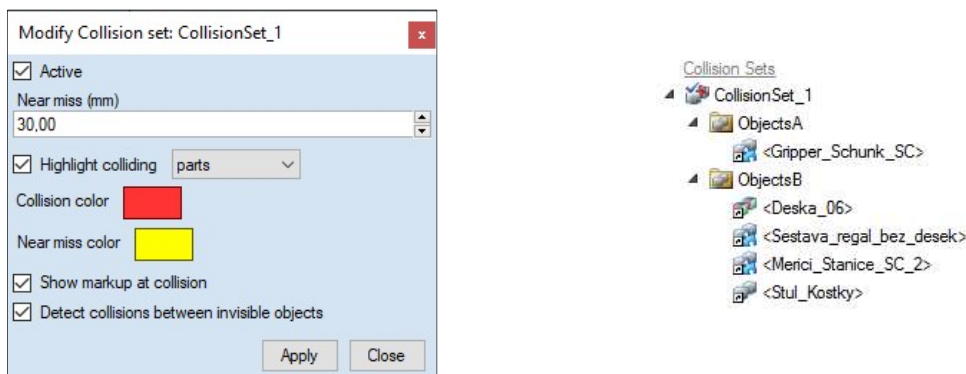
I vzhledem k situaci popsané výše, proběhlo testování jednotlivých robotických procedur s deaktivováním různých Line Sensorů umístěných ve SC daných prvků. Během tohoto testu robot vždy zastavil na řádku programu, na kterém je vyžadována akce *Wait DI*. Z výsledku tohoto testu jde udělat závěr, že je program ve smyslu událostního řízení zpracován dobře, a bylo by možné jej provozovat na reálném pracovišti.

Další test měří dobu pro zpracování jednotlivých desek. Nejprve bylo měřeno zpracování každé desky zvlášť a poté následovalo měření při spuštění procedury, kdy jsou zpracovány všechny desky zároveň. Nejprve proběhlo testování doby jednotlivých cyklů s rychlostmi pohybů nastavených při tvorbě virtuálního modelu. V tabulce (Tab. 3) se jedná o sloupec s názvem 100%*v. Následovalo zvyšování rychlostí o 20% a dále pak o 50% původních hodnot. Hodnoty rychlostí jednotlivých drah se však upravovaly pouze pro dráhy, které jsou volně v prostoru. Rychlosti drah pro připojení nástroje či odebrání jednotlivých desek zůstaly stejné. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce níže (Tab. 3). Další optimalizací průjezdných bodů, rychlostí pohybů, zón a i možnou změnou uspořádání prvků pracoviště by bylo možné docílit úspory provozních časů. Vzhledem k tomu, že zadané pracoviště je experimentální a každý stroj pracoviště je možno obsluhovat zvlášť, výrazná optimalizace rozvržení není na místě.

Tab. 3) Měření doby cyklu při různých rychlostních schématech

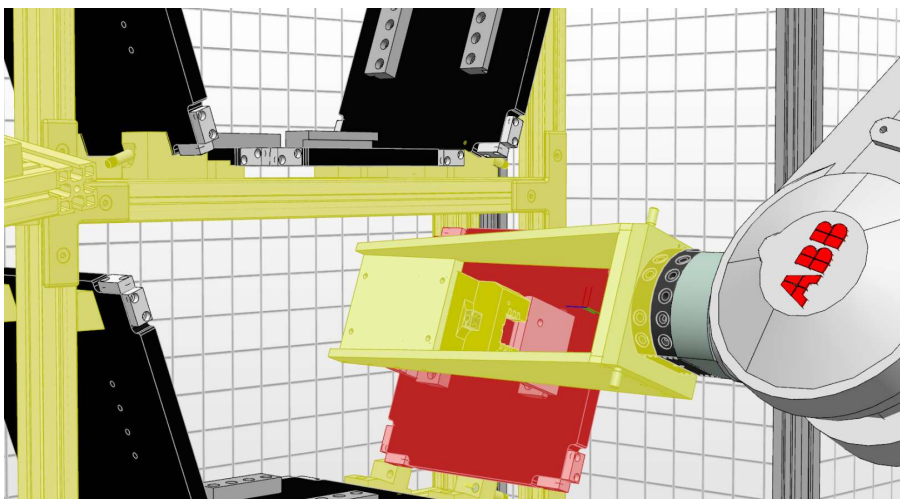
Deska	100%*v	120%*v	150%*v
D1	265	224	171
D2	265	224	171
D3	264	223	170
D4	269	228	173
D5	270	230	174
D6	271	230	175
D1 - D6	1350	1147	877
hodnoty v [s]			

Testování kolizí bylo dalším parametrem pro ověření virtuálního pracoviště. Vzhledem ke skutečnosti, že je virtuální pracoviště složeno z dílů, které odpovídají jejich reálným rozměrům a jediné rozměrové nepřesnosti mohou vznikat pouze umístěním jednotlivých objektů v prostoru, má toto ověření vysokou váhu. Operací pro tuto úlohu byla zvolena manipulace s deskou číslo šest. A to z toho důvodu, že je v regálu umístěna ve spodní šikmé pozici a zároveň je nejdále od měřicí stanice. Byl vytvořen Collision Set, kde do složky ObjectsA byl vložen nástroj Gripper_Schunk_SC a do složky ObjectsB byly vloženy následující prvky: Deska_06, Sestava_regal_bez_desek, Merici_Stalice_SC_2, Stul_kostky (Obr. 49 vpravo). Ověření kolizí probíhalo při nastavení hodnot pro Near miss na 5, 15 a 30mm (Obr. 49 vlevo).



Obr. 49) Nastavení pro Collision Set (vlevo) a kontrolované objekty (vpravo)

Kolize jako taková byla detekována v místě, kde se čelisti nástroje Gripper_Schunk_SC dotýkají desky Deska_06. V tomto případě však nejde o kolizi ve smyslu špatného nastavení drah nebo samotných bodů, ale o způsob uchycení desky nástrojem. Při nastavení parametru Near miss na hodnotu 30mm došlo během průjezdu dráhy k označení regálu s deskami (Obr. 50). Blízký průjezd byl detekován v místě, kde nástroj zajíždí na pozici pro odložení. Je zde stále dostatek prostoru pro vykonání operace, avšak v případě ožiování reálného pracoviště by bylo nutné tomuto místu věnovat zvýšenou pozornost. Stejná situace byla detekována i pro desku pět, která je uložena zrcadlově vůči desce šest.



Obr. 50) Near miss mezi nástrojem a regálem

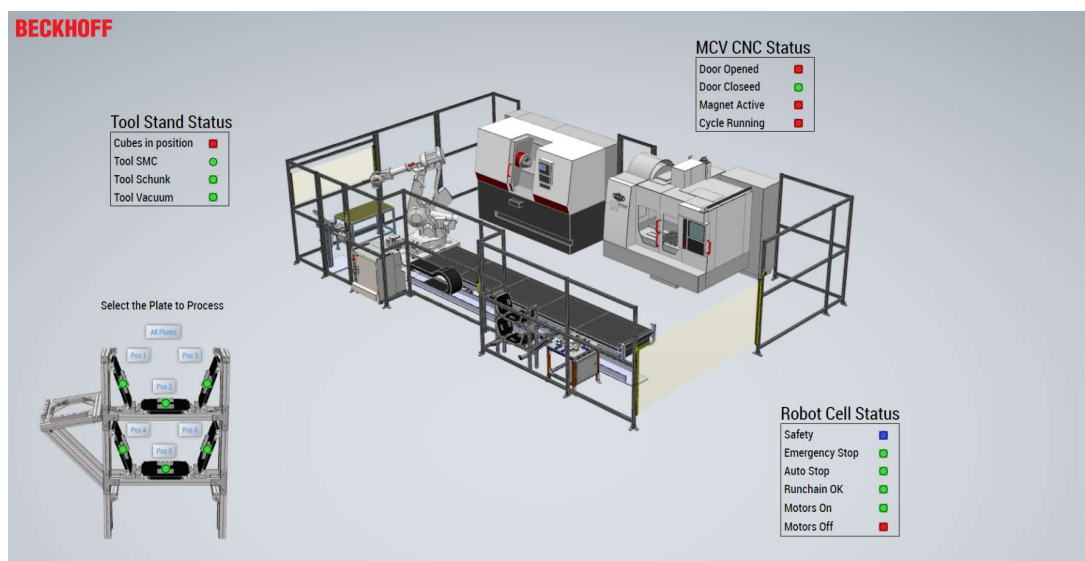
3.2.4 Vytvoření HMI pro virtuální pracoviště

V rámci PLC programu bylo dále vytvořeno uživatelské rozhraní pro spuštění jednotlivých manipulačních procedur. Grafická část HMI (Obr. 51) vychází z modelu pracoviště z programu RS. Jednotlivé potřebné signály jsou namapovány do tlačítek a indikátorů stavu. V centrální části rozhraní je umístěn 3D model pracoviště pro zajištění přehlednosti. Kolem modelu jsou následně umístěny bloky indikátorů, které zobrazují aktuální stav jednotlivých veličin.

Blok u stojanu s nástroji informuje obsluhu o aktuální připravenosti jednotlivých nástrojů.

Blok u obráběcího stroje dále informuje obsluhu o stavu obráběcího stroje ve smyslu, zda jsou jeho dveře otevřené nebo zavřené, zda je magnetické upínání aktivované nebo deaktivované a poslední indikátor informuje o běhu cyklu obráběcího stroje.

Blok u materiálového výstupu z robotické buňky



Obr. 51) HMI

V levém dolním rohu je umístěný obrázek modelu stojanu s deskami. U každé z desek je tlačítko pro volbu zpracování dané desky a nad obrázkem je poté tlačítko pro zpracování všech desek ve stojanu najednou. U každé z desek je indikátor stavu, který udává, zda je daná deska přítomna ve stojanu.

4 ZÁVĚR

Diplomová práce pojednává o digitálním zprovoznění robotizovaného výrobního systému pro obsluhu obráběcího stroje. Na začátku byla zpracována rešerše, která mapuje stávající možnosti na poli průmyslových robotů s ohledem na jejich různé konstrukce a technické parametry. Následovala kapitola se systémovým rozбором zpracovávaného výrobního systému. Praktická část byla poté zaměřena na vytvoření virtuálního modelu pracoviště, tvorbu komunikačního spojení mezi virtuálním modelem a simulovaným PLC, vytvoření SW a jeho následné testování.

Rešerše popisuje různé typy robotů, které je možno použít při návrhu robotizovaného výrobního systému. Dále je zde zpracováno porovnání přesnosti a rychlosti různých typů robotů při zachování jednotné nosnosti. Vzhledem k tomu, že v rámci reálného pracoviště je použit průmyslový robot od společnosti ABB, tak i rešeršní část je věnována robotům od tohoto výrobce. Dále navazuje popis různých simulačních programů, které je možno využít v rámci tvorby digitálního modelu pracoviště. Jsou zde popsány programy Process Simulate, Visual Components a RobotStudio. RobotStudio je poté popsáno blíže vzhledem k tomu, že se jedná o program, ve kterém je zpracován virtuální model pracoviště. Na to navazuje systémový rozbor, který popisuje jednotlivé prvky pracoviště a samotnou výrobní operaci.

Digitální model pracoviště byl vytvořen v programu RobotStudio. Prvkům výrobního systému byly přiřazeny kinematické struktury, aby bylo možno simulovat jejich pohyb v čase a virtuální model tak byl opravdu věrnou kopií reálného výrobního systému. Tento proces zahrnoval vložení geometrie, vybrání těles, které se budou pohybovat, a určení směru a rychlosti jejich pohybu. Jednotlivé mezní stavy mechanismů jsou odečítány pomocí snímačů a je tak možné určit jejich aktuální polohy. Vstupy a výstupy z jednotlivých Smart Component jsou propojeny s kontrolérem robotu přes SC OPC UA Client také s nadřazeným řídicím systémem. SC, které vyžadují na základě úrovní vnitřních signálů určovat výsledné stavy, jsou vybaveny vnitřní logikou, která zprostředkovává pouze dvě úrovně. Toto řešení do jisté míry zjednodušuje následnou práci při nastavování proměnných v rámci PLC SW a tvorbě samotného programu.

Návrh programu pro řízení byl proveden v programu TwinCAT 3 za využití nástaveb TF6100 OPC UA a TF2000 HMI Engineering. Bylo vytvořeno řešení, které obsahuje PLC projekt, Connectivity projekt a HMI projekt. V PLC projektu byla zprovozněna komunikace s programem RobotStudio přes OPC UA a vytvořen PLC program, který ovládá a monitoruje jednotlivé stavy virtuálního pracoviště. HMI projekt obsahuje uživatelské rozhraní člověk – stroj, na kterém je zobrazen 3D náhled pracoviště a jeho jednotlivé stavy. Součástí HMI je také model regálu s deskami s možností volby, kterou desku má výrobní systém zpracovat.

Během práce na této DP jsem si osvojil pokročilé principy tvorby virtuálního modelu pracoviště a jeho následné propojení s řídicím systémem a ověření funkce SW v rámci obou programů. Jedná se o znalosti, které je nutné neustále rozvíjet a udržovat si všeobecný přehled o aktuálních možnostech a trendech, protože co není možné dnes, neznamená, že nebude možné ani zítra, a je dobré se řídit heslem „Konkurence nečeká“.

5 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Nakladatelství VUTIM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] SICILIANO, B., KHATIB, O. *Springer Handbook of Robotics*. Springer-Verlag New York, Inc., 2008. 1611 s. ISBN 978-3-540-23957-4
- [3] IRB 1100 - Nejkompaktnější a nejrychlejší robot. In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1100>
- [4] Technická data pro IRB 1100 In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1100/technick%C3%A1-data-pro-irb-1100>
- [5] Kontroléry OmniCore™ In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/ridici-systemy/omnicore>
- [6] MODULAR ROBOTIC ROTARY JOINT DESIGN [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1452&context=me-sp>
- [7] IRB 1410 In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1410>
- [8] IRB 910SC SCARA In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-910sc>
- [9] IRB 360 FlexPicker™ In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-360>
- [10] Product specification IRB 360 In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC029963-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [11] Product specification IRB 910SC In: *ABB* [online]. [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC056431-001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [12] ISO 9283:1998(en) Manipulating industrial robots — Performance criteria and related test methods In: *Iso.org* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9283:ed-2:v1:en>
- [13] The Role of ChatBot in Industry 4.0 In: *Chatbotslife.com* [online]. 2017 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://chatbotslife.com/the-role-of-chatbot-in-industry-4-0-acf2b0ac8bb6>

- [14] Jak to funguje In: *Virtualnivyroba.cz* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://virtualnivyroba.cz/jak-to-funguje/>
- [15] BRAŽINA, Jakub. Virtuální zprovoznění výrobního systému [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116785>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.
- [16] Process Simulate Tecnomatix In: *Oneplm.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://oneplm.com/tecnomatix-2/>
- [17] Tecnomatix. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tecnomatix>
- [18] UGS Corp. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/UGS_Corp.
- [19] Plant Simulation In: *Cardsplmsolutions.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.cardsplmsolutions.com/en/products/tecnomatix/plant-simulation/>
- [20] Visual Components In: *Visualcomponents.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.cardsplmsolutions.com/en/products/tecnomatix/plant-simulation/>
- [21] Check out what's new in Visual Components 4.0.2. In: *Youtube.com* [online]. 2016 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=JdfNtldXXdc&t=6s>
- [22] Operating manual RobotStudio In: *Abb.sluzba.cz* [online]. 2018 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://abb.sluzba.cz/Pages/Public/IRC5UserDocumentationRW6/en/3HAC032104%20OM%20RobotStudio-en.pdf>
- [23] RobotStudio 3D Printing PowerPac In: *Abb.com* [online]. 2020 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A2114&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [24] PGN-plus 200-1-IS In: *Schunk.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/product/688-0371465-pgn-plus-200-1-is/
- [25] IRB 4400 In: *Abb.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4400>
- [26] IRBT 4004 pro IRB 4400 a IRB 4600 In: *Abb.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/aplikacni-zarizeni-a-prislusenstvi/pojezdy/irbt-4004>

- [27] SWS In: *Schunk.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/series/sws/
- [28] Induktivní snímače a čidla (LVDT) In: *Micro-epsilon.cz* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/inductive-sensor-lvdt/>
- [29] MCV 754 QUICK. KOVOSVIT MAS [online]. Sezimovo Ústí: Kovosvit, 2016 [cit. 2019- 61 03-04]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/mcv-754-quick-p3.html#main>
- [30] Ergonomie pracoviště In: *Bozp.cz* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.bozp.cz/slovník-pojmu/ergonomie-pracoviste/>
- [31] Orion1 Base Light Curtain In: *Abb.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://new.abb.com/low-voltage/products/safety-products/optical-safety-devices/orion1-base>
- [32] Xsens with 3rd party software In: *Xsens.com* [online]. 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://base.xsens.com/knowledgebase/s/article/Xsens-with-3rd-party-software-1605791564844>
- [33] Creating a TMC file and adding it to the TwinCAT project In: *Beckhoff.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3_plc_intro/4713963147.html&id=
- [34] Object POU In: *Beckhoff.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3_plc_intro/2530268811.html&id=
- [35] MFRS-A1-032 430 x 430 In: *Schunk.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_en/clamping-technology/product/52135-0423122-mfrs-a1-032-430-x-430/?fbclid=IwAR1mv_WaFXGHk-sUG710tIo86cO_tePK4xHKmyppq3mZ3AQYck4eSVhKdRo
- [36] DZINIC, Jasmin a Charlie YAO. Simulation-based verification of PLC programs. 2014
- [37] PARK, Sang C a Minho CHANG. Hardware-in-the-loop simulation for a production system. *International Journal of Production Research* [online]. Taylor & Francis Group, 2012, 50(8), 2321-2330 [cit. 2020-02-16]. DOI: 10.1080/00207543.2011.575097. ISSN 0020-7543. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2011.575097>
- [38] JELÍNEK, Pavel. Simulace Processor In the Loop a Hardware In the Loop. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public. 2007, 2007(05).

- [39] REINHART, Gunther a Georg WÜNSCH. Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. *Production Engineering*. 2007, 1(4), 371-379. DOI: 10.1007/s11740-007-0066-0. ISSN 1863-7353. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0066-0>

- [40] ZOUARI, L. a M. ABID. Software In the Loop Simulation for Robot Manipulators. *Engineering, Technology & Applied Science Research* [online]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2017, 7(5), 2017-2021 [cit. 2020-02-16]. DOI: 10.5281/zenodo.1037218. ISSN 2241-4487. Dostupné z: <https://doaj.org/article/d2eefbd8e06c41eeb0fc2b96c3003b3a>

- [41] KALINA, Daniel. Simulace výukových sestav strojů s využitím NX Mechatronics Concept Designer. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Lukáš Novotný.

- [42] History of ABB Robots In: *Robotsdoneright.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/history-of-abb-robots.html>

- [43] Collaboration Domain Specific Information Models In: *Rfid-wiot-search.com* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.rfid-wiot-search.com/images/stories/OPC-foundation-new-international-initiative-to-define-opc-ua-cloud-library_full.jpg?fbclid=IwAR0ZGdqjNNAxCENVnkz4INrPwxyHCeRZ8_GX0vRwsfelFOCMRz9stLrtFCI

6 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

6.1 Seznam zkratek

Zkratka	Význam
PLC	Programmable Logic Controller
R	Regulátor
HW	Hardware
SW	Software
ŘS	Řídicí Systém
AC	Alternating Current
3D	Three Dimensional space
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
HIL	Hardware In the Loop
SIL	Software In the Loop
OLRP	Off-line Robot Programing
PLM	Product Lifecycle Management
PS	Process Simulate
VC	Visual Components
RS	RobotStudio
IRC	Industrial Robot Controller
TCP	Tool Center Point
ÚVSSR	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
CNC	Computer Numeric Controll
HMI	Human Machine Interface
OS	Obráběcí Stroj
SC	Smart Component
SR	Set Reset
SS	Souřadný Systém
PC	Personal Computer
ES	Emergency Stop
CSV	Coma Separted Value
DI	Digital Input
DO	Digital Output
GVL	Global Variable List
URL	Uniform Resource Locator

6.2 Seznam obrázků

Obr. 1) Průmyslový robot IRB1100 [3]	16
Obr. 2) Blokové schéma servopohonu	17
Obr. 3) Převod krouticího momentu 5. osy (vlevo) [6] řídicí systém OmniCore průmyslového robotu (vpravo) [5]	17
Obr. 4) Průmyslový robot IRB 1410 (vlevo) [7] robot IRB 910SC (vpravo) [8]	18
Obr. 5) Delta robot s popisem os (vlevo) [10] fotografie delta robotu (vpravo) [9]	19
Obr. 6) Parametry přesnosti polohy pro bod (vlevo) a pro dráhu (vpravo) [10]	20
Obr. 7) Jednotlivé prvky Průmyslu 4.0. Přeloženo z [13]	21
Obr. 8) Možnosti komunikace přes OPC UA [43]	22
Obr. 9) HIL. Vychází z [41]	23
Obr. 10) SIL. Vychází z [41]	23
Obr. 11) Schématické znázornění komunikace v rámci výrobního systému	23
Obr. 12) Digitální model pracoviště (vlevo) [16] model celého výrobního areálu (vpravo) [19]	24
Obr. 13) Uživatelské prostředí programu Visual Components 4.0.2 [21]	25
Obr. 14) Uživatelské prostředí programu RobotStudio	26
Obr. 15) Příklady 3D tisku pomocí průmyslového robotu. 3D tisk nábytku (vlevo) a 3D tisk pomocí svařování (vpravo) [23]	27
Obr. 16) 3D náhled pracoviště v RS	28
Obr. 17) Stojan na nástroje (vlevo) a nástroj s chapadlem Schunk (vpravo)	29
Obr. 18) IRB4400 a IRBT4004	30
Obr. 19) Systém automatické výměny nástrojů [27]	30
Obr. 20) Regál bez desek (vlevo) a samotná deska (vpravo)	31
Obr. 21) Měřicí stanice	31
Obr. 22) CNC obráběcí stroj MCV 754 Q (vlevo) a magnetický upínač MFRS-A1-032 (vpravo)	32
Obr. 23) Bezpečnostní oplocení s dalšími prvky	33
Obr. 24) Robot na pojezdu (vlevo) a umístění počátku souřadnic World (vpravo)	35
Obr. 25) Smart Component ze modelu MCV 754 Q	36
Obr. 26) Adaptér (vlevo) a vakuový gripper (vpravo)	37
Obr. 27) Gripper s chapadlem SMC (vlevo) a Gripper s chapadlem Schunk (vpravo)	38
Obr. 28) Tooldata Schunk	38
Obr. 29) Tooldata pro: Gripper Vacuum (vlevo), Gripper SMC (uprostřed) a Gripper Schunk (vpravo)	39
Obr. 30) Adaptér (vlevo) a tooldata pro adaptér (vpravo)	39
Obr. 31) Stojan s deskami (vlevo) a detail skluzu s lokálním SS a Line Sensorem (vpravo)	40
Obr. 32) Polohy měřicí stanice: Měří (vlevo), Deska může být odebrána (vpravo)	41
Obr. 33) Line Sensory uvnitř pneumatické válce	42
Obr. 34) SC pro měřicí stanici	42
Obr. 35) Bezpečnostní optická závora u materiálového vstupu	43
Obr. 36) Smart Component pro bezpečnostní prvky	43
Obr. 37) Celkový pohled na osazené dveře (vlevo) a detail Line Sensoru v prostoru bezpečnostní kliky (vpravo)	44
Obr. 38) Signály pro zprovoznění virtuálního pracoviště	45

Obr. 39) Station Logic virtuálního pracoviště	46
Obr. 40) Pohybová procedura pro založení desky do CNC OS (vlevo) a soubor všech potřebných procedur pro zpracování jedné desky (vpravo)	47
Obr. 41) Část procedury v jazyce RAPID	47
Obr. 42) OPC UA Smart Component. Vlastnosti SC (vlevo) a zobrazení SC v rámci Station Logic (vpravo)	48
Obr. 43) Procedura Main v kódu RAPID	49
Obr. 44) Nastavení přihlašování k OPC UA Serveru	50
Obr. 45) Nastavení OPC UA Serveru	51
Obr. 46) Příklad zapsání globálních proměnných (vlevo) a nastavení PLC projektu (vpravo)	51
Obr. 47) Sample Client - náhled	52
Obr. 48) Část PLC programu pro ovládání CNC frézky	53
Obr. 49) Nastavení pro Collision Set (vlevo) a kontrolované objekty (vpravo)	55
Obr. 50) Near miss mezi nástrojem a regálem	55
Obr. 51) HMI	56

6.3 Seznam tabulek

Tab. 1) Porovnání přesnosti různých typů robotů [4], [10], [11]	20
Tab. 2) Ukázka konfiguračního souboru	48
Tab. 3) Měření doby cyklu při různých rychlostních schématech	54

7 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: 162177_Roun_DP.tnzip
Příloha 2: 162177_Roun_DP_02.rspag
Příloha 3: RS_Config_Bezpecnost.csv
Příloha 4: RS_Config_CNCCMCV.csv
Příloha 5: RS_Config_MericiStanice.csv
Příloha 6: RS_Config_StojanNaDesky.csv
Příloha 7: RS_Config_StojanNaNastroje.csv
Příloha 8: RS_Config_System_IO.csv